

## USO DE DADOS DE SATÉLITE PARA SIMULAÇÃO DE VAZÕES COM O MODELO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DE RIO DOS BUGRES, SANTA CATARINA

Jaqueline Cremonini

Florianópolis, 2017

Jaqueline Cremonini

**USO DE DADOS DE SATÉLITE PARA SIMULAÇÃO DE  
VAZÕES COM O MODELO SWAT NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DE RIO DOS BUGRES, SANTA CATARINA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado a Universidade Federal de  
Santa Catarina para Conclusão do  
Curso de Graduação em Engenharia  
Sanitária e Ambiental.

Orientador (a): Tássia Mattos  
Brighenti, Me.

Coorientador (a): Prof.<sup>a</sup> Nadia Bernardi  
Bonumá, Dr.<sup>a</sup>

Florianópolis  
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cremonini, Jaqueline

Uso de dados de satélite para simulação de vazões  
com o modelo SWAT na bacia hidrográfica de Rio dos  
Bugres, Santa Catarina / Jaqueline Cremonini ;  
orientador, Tássia Mattos Brighenti, coorientador,  
Nádia Bernardi Bonumá, 2017.  
87 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro  
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2.  
Precipitação. 3. TRMM. 4. SWAT. 5. Rio dos Bugres.  
I. Brighenti, Tássia Mattos. II. Bonumá, Nádia  
Bernardi. III. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental. IV. Título.

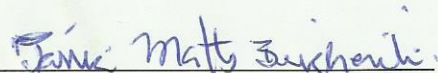
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL


USO DE DADOS DE SATÉLITE PARA SIMULAÇÃO DE  
VAZÕES COM O MODELO SWAT NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DE RIO DOS BUGRES, SANTA CATARINA


Jaqueline Cremonini

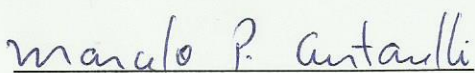
Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte  
dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação  
em Engenharia Sanitária e Ambiental–TCC II

**Banca Examinadora:**

  
Tássia Mattos Brighenti, Me.  
(Orientadora)

  
Prof.ª Nadia Bernardi Bonumá, Dr.ª  
(Coorientadora)

  
Prof. Pedro Borges Chaffe, Dr.  
(Membro da banca)

  
Marcelo Pedroso Curtarelli, Dr.  
(Membro da banca)

*Dedico esse trabalho a minha família  
e aos meus amigos, que me apoiaram  
e ajudaram a construir a minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Deixo aqui meus agradecimentos a todos aqueles que contribuíram, das mais diversas maneiras, para a minha formação e realização desse trabalho.

A Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais, Leocir Antonio Cremonini e Salete Vicensi Cremonini, que com muito amor, carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

A minha irmã Júlia Cremonini, por alegrar meus dias e ser meu porto seguro em todos os momentos.

A Matheus Schlischtig Ferreira, pela compreensão nos momentos que estive ausente e também por todo amor, amizade e carinho que tem me oferecido.

Aos meus amigos por torcerem pelo meu sucesso, pelo apoio e por todos os momentos agradáveis que sempre me proporcionaram. Agradeço também aos meus amigos da Fundação CERTI, pelos ensinamentos, discussões e pelos bons momentos que tivemos na empresa.

Meu agradecimento especial à minha orientadora, Tássia Mattos Brighenti, pela confiança, conselhos e conhecimentos passados a mim que foram fundamentais na construção desse trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, por todos os ensinamentos repassados ao longo desses anos de graduação.

Aos membros da banca examinadora, pelas significativas contribuições que enriqueceram este trabalho.

Meu muito obrigada a todos!

## RESUMO

A precipitação é uma das variáveis mais importantes do ciclo hidrológico e um dado de entrada indispensável em modelos hidrológicos. Porém, algumas regiões não possuem medição pontual de chuva ou quando existentes incluem períodos de observação curtos e incompletos. Assim, estimativas de precipitação por satélite são uma ferramenta extremamente útil. O objetivo desse trabalho é avaliar o uso de dados de precipitação estimados pelo produto TRMM 3B42 em comparação com dados medidos em campo na simulação de vazões utilizando o modelo SWAT na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres, Santa Catarina no período de 2011 a 2014. A calibração foi realizada no *software* SWAT-CUP e o desempenho do modelo avaliado pelas funções objetivo *Percent bias*, Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* e Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* Modificado. Os resultados mostraram que as estimativas de precipitação do TRMM tenderam a superestimar a precipitação na região. Para a vazão, o modelo teve sucesso no ajuste do volume de vazão diária, porém os picos de vazão não foram bem representados e as vazões de base foram minimizadas. Conclui-se que as estimativas do satélite representaram o comportamento da chuva na área da bacia, bem como, produziram estimativas confiáveis dos diferentes componentes do balanço hídrico.

**Palavras-chave:** precipitação, TRMM, SWAT, Rio dos Bugres

## **ABSTRACT**

Precipitation is one of the most important variables of the hydrological cycle and an indispensable input in hydrological models. However, some regions do not have rain gauges measurements or if existing they include short and incomplete observation periods. In turn, satellite precipitation estimates are an extremely useful tool. The objective of this work is to evaluate the use of precipitation data estimated by the TRMM 3B42 product in comparison with measured data for discharge simulations using the SWAT model in the Bugres River basin, Santa Catarina from 2011 to 2014. The calibration was performed in the SWAT-CUP software and the performance of the model evaluated by Percent bias, Nash-Sutcliffe Coefficient and Modified Nash-Sutcliffe Coefficient. The results showed that TRMM precipitation estimates tended to overestimate precipitation in the region. For the discharge, the model was successful in adjusting the daily discharge volume for TRMM precipitation estimates, but the discharge peaks were not well represented and the base discharges were minimized. It is concluded that the satellite estimates represented the rainfall behavior over the basin area, as well as, it was able to quantify the water balance components.

**Keywords:** precipitation, TRMM, SWAT, Bugres River



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Instrumentos transportados pelo satélite TRMM. ....	9
Figura 2 - Representação do ciclo hidrológico do SWAT. ....	17
Figura 3 - Fluxograma dos procedimentos realizados nesse trabalho... ..	23
Figura 4 - Localização da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC. ....	24
Figura 5 - Modelo Digital do Terreno (DEM) e hidrografia para a bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - Santa Catarina. ....	25
Figura 6 - Uso e ocupação do solo para a bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - Santa Catarina.....	26
Figura 7 - Tipo de solo para a bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - Santa Catarina. ....	26
Figura 8 - Delimitação das sub-bacias (HRUs) realizada pelo SWAT para a bacia hidrográfica Rio dos Bugres - Santa Catarina.....	29
Figura 9 - Regressão linear dos dados de precipitação com preenchimento de falhas pelo gerador automático climatológico do SWAT.....	41
Figura 10 - Regressão linear dos dados de precipitação sem preenchimento de falhas.....	43
Figura 11 - Comparação da precipitação média mensal dos dados medidos e estimada pelo produto TRMM 3B42 na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC.....	43
Figura 12 - Histograma de frequência da precipitação diária da chuva medida e estimada pelo satélite TRMM na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC.....	44
Figura 13 - Ordenamento dos parâmetros mais sensíveis identificados nas simulações diárias a partir dos dados de precipitação (a) medidos e (b) estimados pelo satélite TRMM para as funções objetivo Pbias, NS e MNS, respectivamente. ....	46
Figura 14 - Vazão calibrada para a função objetivo Pbias a partir da precipitação (a) medida e (b) estimada pelo satélite TRMM na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC no período de 2011 a 2014. ....	49
Figura 15 - Vazão calibrada para a função objetivo NS a partir da precipitação (a) medida e (b) estimada pelo satélite TRMM na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC no período de 2011 a 2014. ....	50
Figura 16 - Vazão calibrada para a função objetivo MNS a partir da precipitação (a) medida e (b) estimada pelo satélite TRMM na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC no período de 2011 a 2014. ....	51
Figura 17 - Curvas de permanência em escala logarítmica das vazões calibradas na BHRB para as funções objetivo Pbias, NS e MNS a partir	

das vazões simuladas a) dos dados medidos e b) dos dados estimados pelo satélite TRMM no período de 2011 a 2014.....	56
Figura 18 - Demonstração dos valores envolvidos no balanço hídrico anual médio da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC utilizando dados medidos no período de 2011 a 2014. ....	57
Figura 19 - Demonstração dos valores envolvidos no balanço hídrico anual médio da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC utilizando o produto TRMM 3B42 no período de 2011 a 2014. ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo de estudos que buscaram avaliar os produtos de precipitação estimados pelo satélite TRMM em diversas regiões do Brasil.....	12
Tabela 2 - Nomenclatura e descrição dos tipos de solo presentes na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - Santa Catarina. ....	27
Tabela 3 - Precipitação média anual da sub-bacia decorrente dos dados medidos e estimados no período de 2011 a 2014.....	41
Tabela 4 - Estatística descritiva das séries de precipitação médias diárias e total medida e estimada pelo TRMM. ....	42
Tabela 5 - Valores de Pbias, NS e MNS sem calibração e após a calibração da vazão diária a partir dos dados de precipitação medidos em campo. ....	47
Tabela 6 - Valores de Pbias, NS e MNS sem calibração e após a calibração da vazão diária para os dados de precipitação do produto TRMM 3B42.....	47
Tabela 7 - Parâmetros e faixa de valores finais obtidos para a calibração diária das simulações diárias com as funções objetivo Pbias, NS e MNS para os dados medidos e os dados estimados pelo satélite TRMM.....	53

## LISTA DE SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas  
BHRB – Bacia Hidrográfica de Rio dos Bugres  
CERES - Clouds and the Earth's Radiant Energy System  
CH\_L2 - Comprimento do rio principal  
CH\_W2 - Largura média do rio principal  
CIRAM - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina  
CMORPH - Climate Prediction Center Morphing Technique Product  
CN – Curva número  
CN2 - Curva Número inicial para condição de umidade do solo II  
CPC - Climate Prediction Center  
CREST - Coupled Routing and Excess Storage  
DEM - Modelo Digital do Terreno  
EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina  
GOES - Geoestationary Operational Environmental System  
GPCC - Centro Global de Climatologia por Precipitação  
GW\_DELAY - Tempo de atraso para a recarga do aquífero  
GW\_QMN - Profundidade limite do aquífero superficial para que o escoamento superficial inicie  
GW\_REVAP - Coeficiente de saída da água subterrânea  
HRU – Unidade de Resposta Hidrológica  
JAXA - Agência de Exploração Aeroespacial do Japão  
LabHidro - Laboratório de Hidrologia  
LATTIME - Escoamento lateral  
LIS - Lightning Imaging Sensor  
MNS - Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* Modificado  
NASA - Agência Espacial Americana  
NS – Coeficiente de *Nash-Sutcliffe*  
NRCS - Serviço de Conservação dos Recursos Naturais dos Estados Unidos  
Pbias – *Percent Bias*  
PR - Precipitation Radar  
SCS - Soil Conservation Service  
SOL\_AWC - Capacidade de água disponível na camada de solo  
SOL\_BD - Densidade úmida aparente)  
SOL\_K - Condutividade hidráulica saturada da primeira camada  
SUFI2 – Sequential Uncertainty Fitting  
SWAT – Soil and Water Assessment Tool

SWAT CUP - SWAT Calibration and Uncertainty Procedures

TMI - TRMM Microwave Imager

TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

USDA - Serviço de Pesquisas Agrícolas

VIRS - Visible and Infrared Scanner

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	área da sub-bacia (km <sup>2</sup> )
$aq_{sh}$	quantidade de água armazenada no aquífero superficial (mm)
$aq_{dp}$	quantidade de água armazenada no aquífero profundo (mm)
$C$	coeficiente de escoamento superficial
$c_p$	calor específico a pressão constante (MJ/kg.°C)
$e_z^0$	pressão de saturação do vapor no ar na altitude $z$ (kPa)
$e_z$	pressão de vapor da água no ar na altitude $z$ (kPa)
$E$	evaporação (mm)
$E_a$	evapotranspiração total diária no dia $t$ (mm)
$FC_{ly}$	quantidade de água que a camada de solo pode suportar (mm)
$G$	densidade de fluxo de calor do solo (MJ/m <sup>2</sup> .d)
$H_{net}$	radiação líquida (MJ/m <sup>2</sup> .d)
$h_{wtbl}$	altura do lençol freático (m).
$i$	intensidade da precipitação (mm/h)
$I_a$	valores iniciais de armazenamento superficial, interceptação e infiltração (mm)
$K_{sat}$	condutividade hidráulica saturada (mm/h)
$L_{gw}$	distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal (m)
$L_{hill}$	comprimento da declividade (m).
$P$	precipitação (mm)
$Q$	escoamento superficial (mm)
$Q_{gp}$	vazão de retorno no dia $t$ (mm)
$Q_{lat}$	quantidade de água que escoar sub-superficialmente (mm)
$\overline{Q_m}$	vazão medida (m <sup>3</sup> /s)
$\overline{Q_m}$	vazão média medida (m <sup>3</sup> /s)
$Q_s$	vazão simulada (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{surf}$	escoamento superficial no dia $t$ (mm)
$Q_{peak}$	vazão de pico (m <sup>3</sup> /s)
$Q_w$	escoamento subterrâneo no canal principal no dia $t$ (mm)
$r_a$ e $r_c$	resistências totais de aerodinâmica e cobertura (s/m)
$R_{day}$	precipitação total diária no dia $t$ (mm)
$R_{tc}$	quantidade de chuva que cai durante o tempo de concentração (mm)

$S$	parâmetro de retenção (mm)
$slp$	declividade média da sub-bacia (m/m)
$S_{max}$	valor máximo que o parâmetro de retenção pode assumir no dia (mm)
$SW$	quantidade de água que pode existir em todo perfil excluindo a quantidade de água existente no ponto de murcha permanente (mm)
$SW_0$	quantidade inicial de água no solo (mm)
$SW_t$	quantidade final de água no solo (mm)
$SW_{ly}$	quantidade de água existente na camada de solo (mm)
$SW_{ly,excess}$	quantidade de água que pode percolar no dia (mm)
$t$	tempo (dias)
$t_{cc}$	tempo de concentração do escoamento no canal (horas)
$t_{conc}$	tempo de concentração (horas)
$t_{cs}$	tempo de concentração do escoamento terrestre (horas)
$w_{seep}$	quantidade de água que entra e é armazenado no solo no dia $t$ (mm)
$w_1$ e $w_2$	coeficientes de forma
$\gamma$	constante psicrométrica (kPa/°C)
$\Delta$	declividade da curva de saturação da pressão de vapor com a temperatura
$\rho_{ar}$	densidade do ar (kg/m <sup>3</sup> )
$\alpha_{tc}$	fração de chuva que ocorre durante o tempo de concentração
$\lambda E$	fluxo de densidade do calor latente (MJ/m <sup>2</sup> .d)
$\Delta S$	mudança no armazenamento (mm)
$\phi_d$	porosidade da camada drenável do solo (mm/mm)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS .....	3
1.1.1	Objetivo geral .....	3
1.1.2	Objetivos específicos .....	3
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	CICLO HIDROLÓGICO .....	4
2.2	PRECIPITAÇÃO .....	5
2.3	SATÉLITE TRMM .....	8
2.3.1	Aplicação dos dados do TRMM no Brasil .....	11
2.4	MODELOS HIDROLÓGICOS .....	13
2.4.1	Análise de sensibilidade, calibração e validação de modelos hidrológicos .....	14
2.5	MODELO HIDROLÓGICO - SWAT .....	15
2.5.1	Programa SWAT-CUP .....	19
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>23</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	23
3.2	DADOS DE ENTRADA .....	24
3.2.1	Material cartográfico .....	25
3.2.2	Dados de precipitação .....	28
3.3	MODELO SWAT .....	28
3.3.1	Escoamento superficial .....	30
3.3.2	Evapotranspiração .....	34
3.3.3	Água no solo .....	36
3.3.4	Água subterrânea .....	37
3.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO COM O SWAT-CUP .....	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
4.1	COMPARAÇÃO DA CHUVA .....	41
4.2	COMPARAÇÃO DA VAZÃO .....	44



<b>4.2.1</b>	<b>Análise de sensibilidade.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Calibração .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Curvas de permanência.....</b>	<b>54</b>
<b>4.3</b>	<b>BALANÇO HÍDRICO .....</b>	<b>57</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A precipitação é uma das variáveis mais importantes do ciclo hidrológico e também um dado de entrada indispensável em modelos hidrológicos. A chuva pode ser medida pontualmente de forma direta com aparelhos como pluviômetros e pluviógrafos, ou espacialmente de maneira indireta através de radares meteorológicos e sensores a bordo de satélites. A densidade de pontos e frequência amostral da precipitação influenciam diretamente na qualidade dos dados de precipitação, que por sua vez, influenciam significativamente na determinação hidrológica (MASIH et al., 2011; XU et al., 2013).

Segundo Chappel et al. (2013), áreas que possuem maior densidade de pluviômetros fornecem estimativas de precipitação mais confiáveis do que aqueles que possuem baixa densidade de pluviômetros. Porém, uma rede de estações pluviométricas possui elevado custo econômico e exige dedicação de técnicos especializados para recolher dados, manter os equipamentos e controlar a consistência dos dados, como consequência, o número de estações em uma área normalmente está abaixo do ótimo e os dados disponíveis podem incluir períodos de observação curtos e incompletos (MONTEIRO et al., 2015).

O sensoriamento remoto via satélite pode fornecer os dados de precipitação espacial em grandes áreas e de forma contínua. Estimativas de precipitação provenientes do sensoriamento remoto podem melhorar o desempenho do modelo hidrológico em comparação com simulações conduzidos apenas com dados de medição local (MORENO et al., 2012). No entanto, como os produtos do sensoriamento remoto são de medição indireta, seus resultados podem variar de um lugar para o outro, sendo necessário avaliar o seu desempenho com dados de medições locais antes de ser aplicado para uma área específica (LIU et al., 2014).

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão utilizado para gestão de bacias hidrográficas, pois consegue prever o impacto da gestão da água, sedimentos e químicos agrícolas em bacias hidrográficas que não possuem medição através da utilização de dados de entrada como tipo de solo, uso do solo e informações de estações meteorológicas (ARNOLD et al., 1998).

Nesse sentido, o presente trabalho possui como objetivo principal avaliar o uso de dados de precipitação diários estimados pelo produto TRMM 3B42 em comparação com dados diários medidos na simulação de vazões utilizando o modelo hidrológico SWAT, no período de 2011 a 2014 para a bacia hidrográfica de Rio dos Bugres, localizada no

município de Rio Negrinho, Santa Catarina. A bacia foi escolhida com o intuito de dar prosseguimento aos trabalhos realizados na região (e.g. Cardoso, 2013 e Grison, 2013). Visto que o monitoramento na bacia foi encerrado em 2014, o sensoriamento remoto via satélite em conjunto com a modelagem hidrológica se apresentam como ferramentas muito valiosas para que os estudos na região tenham continuidade.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o uso de dados de precipitação estimados pelo produto TRMM 3B42 em comparação com dados de precipitação medidos na simulação de vazões utilizando o modelo SWAT para a bacia hidrográfica de Rio dos Bugres –SC.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar os dados de chuva medidos em campo com os dados estimados pelo produto TRMM 3B42;
- Realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo quando são usados dados de chuva medidos e estimados pelo produto TRMM 3B42;
- Calibrar o modelo SWAT para os dois cenários de vazões simuladas (dados medidos e estimados pelo produto TRMM 3B42) na bacia hidrográfica;
- Avaliar os balanços hídricos resultantes para as duas diferentes entradas (dados medidos e estimados pelo produto TRMM 3B42) na bacia hidrográfica;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico refere-se ao fenômeno global de circulação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (TUCCI, 1997). Nos últimos anos, com o advento do monitoramento da superfície terrestre via satélites, a obtenção de informações sobre as variáveis do ciclo hidrológico como evaporação, precipitação e escoamento superficial em escala global ficaram cada vez mais acessíveis permitindo aos cientistas obter o conhecimento de como o ciclo hidrológico se comporta ao redor do mundo (DAVIE, 2008).

A bacia hidrográfica ou bacia de contribuição de uma seção de um curso de água é a área geográfica coletora de água de chuva que, escoando pela superfície do solo, atinge a seção considerada (PINTO et al., 1976). Para Tucci (1997), a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. É composta por conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exutório.

O balanço hídrico é expresso por uma equação hidrológica que representa a quantificação da água presente nas fases do ciclo hidrológico, para um determinado intervalo de tempo e em um espaço físico definido, sendo este normalmente a bacia hidrográfica (FREIRE e OMENA, 2005). Em outras palavras, a equação do balanço hídrico é a descrição matemática dos processos hidrológicos que estão operando dentro de determinada escala de tempo e espaço e incorpora princípios de continuidade de massa e energia (DAVIE, 2008). A fundamental do balanço hídrico é representada na Equação 1.

$$P \pm E \pm \Delta S \pm Q = 0 \quad (1)$$

onde,  $P$  é a precipitação,  $E$  é a evaporação,  $\Delta S$  é a mudança no armazenamento e  $Q$  é o escoamento superficial. A terminologia  $\pm$  indica que cada termo pode ser positivo ou negativo, por exemplo, precipitação pode ser um ganho (positivo) para a superfície terrestre ou uma perda (negativo) para a atmosfera. Da mesma forma, a mudança no armazenamento de ser positiva ou negativa, ou seja, a água pode ser

liberada do armazenamento (negativo) ou absorvida para o armazenamento (positivo).

Assim, a precipitação é a variável climática de maior relevância na determinação dos cálculos do balanço hídrico pois ela é fonte predominante e definitiva da parcela de água terrestre que entra na bacia hidrográfica para compor o ciclo hidrológico (FEKETE et al., 2004).

## 2.2 PRECIPITAÇÃO

A precipitação é o componente fundamental do ciclo hidrológico, responsável pela renovação dos recursos hídricos que estão diretamente relacionados ao desenvolvimento econômico, ecológico e agrícola (LI et al., 2015). Na literatura, precipitação pode ser definida como o conjunto de águas provenientes do vapor de água da atmosfera que em estado sólido ou líquido é depositada na superfície terrestre como chuva, granizo, orvalho, neblina, neve, nevoeiro, sereno ou geada (GARCEZ, 1967; PINTO et al., 1976). A precipitação, na sua forma mais comum que é a chuva, ocorre quando complexos fenômenos de aglutinação e crescimento de microgotículas, em nuvens com presença significativa de umidade (vapor de água) e núcleos de condensação (poeira ou gelo), formam uma grande quantidade de gotas com tamanho e peso suficientes para que a força da gravidade supere a turbulência normal ou movimentos ascendentes do meio atmosférico (TUCCI, 1997).

A precipitação pode ser medida basicamente de duas maneiras: de maneira direta (pontualmente) com pluviômetros e pluviógrafos, ou de maneira indireta (espacialmente) com radares meteorológicos e sensores a bordo de satélites (TUCCI, 1997). O pluviômetro é um recipiente de volume suficiente para conter as maiores precipitações dentro do intervalo de tempo definido para frequência das observações (em geral 24 horas). Acima desse recipiente é colocado um funil com um anel receptor biselado que deve ficar bem horizontal e define a área de interceptação. A medida da precipitação representa a profundidade da água (em milímetros ou polegadas) que se acumularia na superfície se toda a chuva permanecesse no lugar que caiu. O volume é convertido em medida de precipitação através da divisão pela área do pluviômetro (DAVIE, 2008). Devido à variabilidade temporal dos eventos chuvosos, utiliza-se o equipamento automático (pluviógrafo) que permite medir as intensidades das chuvas durante intervalos de tempos inferiores aqueles obtidos com as observações manuais feitas nos pluviômetros (TUCCI, 1997).

No tipo de medição pontual existem quatro principais fontes de erros e imprecisões: (1) perdas devido à evaporação; (2) perdas devido ao umedecimento do pluviômetro; (3) excesso de medição devido a respingos da área circundante; e (4) sub medição devido a turbulências ao redor do pluviômetro. Para eliminar ou minimizar esses erros, os pluviômetros devem ser fabricados em forma de funil e com material antiaderente, permitindo que a chuva atinja em uma área maior e possa escorrer facilmente pela abertura sendo armazenada no recipiente localizado abaixo. Além disso, para eliminar os respingos, pluviômetros devem ser colocados acima do chão ou dispostos em um local que não tenha possibilidade de respingos e para eliminar as turbulências ao redor do pluviômetro é importante colocar um anteparo impedindo qualquer queda do equipamento (DAVIE, 2008).

Os radares meteorológicos e sensores a bordo de satélites pertencem ao grupo de medição indireta por sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto é definido por Mendes (1990), como sendo a utilização conjunta de sensores, a bordo de aeronaves ou espaçonaves, equipamentos para transmissão dos dados coletados pelos sensores e equipamentos para processamento dos mesmos, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre por meio das interações entre energia eletromagnética e os elementos que compõe a superfície da Terra e a atmosfera. Segundo Lillesand e Kiefer (1994) *apud* Schutz and Engman (2000), sensoriamento remoto é definido como sendo a ciência e arte de obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno através de análises de dados adquiridos por um dispositivo (sensor) que não está em contato direto com o objeto de investigação.

As estimativas de precipitação por satélite começaram em 1970 com o advento dos satélites meteorológicos (CHAPPELL et al., 2013). Segundo Yamasoe (2004), satélites artificiais são desenvolvidos para realizar medições de radiação eletromagnética (REM) emitida, refletida ou espalhada pela atmosfera e superfície. A partir de tais medições é possível a determinação de valores físicos reais da atmosfera e superfície. Para Florenzano (2008), satélite é todo objeto que gira em torno de outro objeto e permanece em órbita devido a aceleração da gravidade da Terra.

A principal diferença entre o radar e o satélite é que o radar estima a quantidade de precipitação caindo sobre uma área no sentido da terra para a atmosfera (parte inferior da nuvem) enquanto o satélite estima no sentido do espaço em direção à superfície da terra (parte superior da nuvem) (DAVID, 2008). As nuvens que estão propícias a produzir chuva são muito brilhantes e possuem a parte superior fria. São

essas as características observadas do espaço por um satélite. Os satélites passivos são a forma mais comum (o satélite recebe radiação de outra fonte, normalmente o sol) e detecta radiação nas bandas de ondas visível e infravermelha. LANDSAT, SPOT E AVHRR são exemplos de plataformas de satélites desse tipo (DAVID, 2008).

Embora a medição e os aparelhos da medição pontual sejam simples, a aquisição de dados de chuva de boa qualidade por esse método é bastante difícil (MONTEIRO et al., 2015). As resoluções espaciais e temporais de precipitação influenciam diretamente na qualidade dos dados, e ambos têm impactos significativos na determinação hidrológica (MICHAELIDES et al., 2009; MASIH et al., 2011; XU et al., 2013). Em geral, medidores de precipitação pontual fornecem estimativas primárias de precipitação, na qual, calcula-se a precipitação regional, por métodos de interpolação, tais como Kriging, polígonos Thiessen e análise de tendência de superfície (LI et al., 2015).

Áreas que possuem maior densidade de pluviômetros fornecem estimativas de chuva mais confiáveis do que aqueles que possuem baixa densidade de pluviômetros (CHAPPELL et al., 2013). Porém, uma rede de estações meteorológicas que seja densa o suficiente possui elevado custo econômico na qual poucos países podem pagar (MONTEIRO et al., 2015). A operação de estações meteorológicas exige dedicação constante de técnicos especializados e treinados para recolher dados, manter os equipamentos e controlar a consistência dos dados coletados. Como consequência, o número de estações em uma área de interesse normalmente está abaixo do ótimo e os dados disponíveis incluem períodos de observação curtos, incompletos e de baixa qualidade, impedindo a sua utilizados em aplicações hidrológicas (LIU et al., 2014; MONTEIRO et al., 2015).

Em contraste, o sensoriamento remoto via satélite pode fornecer os dados de precipitação espacial em grandes áreas e de forma contínua. Moreno et al. (2012) revelou que estimativas de precipitação quantitativas provenientes do sensoriamento remoto melhoraram o desempenho do modelo hidrológico em comparação com simulações conduzidos apenas com dados de pluviômetro.

Atualmente, vários produtos de sensoriamento remoto de alta resolução estão sendo utilizados para recuperar as chuvas incluindo o Geoestationary Operational Environmental System (GOES), tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) e Climate Prediction Center Morphing Technique Product (CMORPH) (KUREK et al., 2015). No entanto, pelo fato desses produtos serem de medição indireta e possuírem orientação global (ou semi-global), seus desempenhos podem



variar de um lugar para outro. Portanto, é necessário avaliar os desempenhos dos produtos de precipitação via satélite com dados de medições locais antes que esses produtos possam ser usados com confiança em uma área de estudo específica (LIU et al., 2014).

## 2.3 SATÉLITE TRMM

O Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) foi uma missão realizada entre a Agência Espacial Americana (NASA) e a Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA) para obtenção de dados de precipitação de alta qualidade para pesquisas climáticas nas regiões tropical e subtropical do planeta. O satélite TRMM foi lançado no final de novembro de 1997 e terminou sua missão em 8 de abril de 2015, produzindo 17 anos de dados científicos (PMM, 2016). O satélite tinha órbita circular e inclinado  $35^\circ$  em relação ao equador. A órbita iniciou numa altitude de 350 km (27/11/1997 até 08/08/2001) e mudou sua altitude para 403 km no final de sua missão (24/08/2001 até julho de 2014) (GES DISC, 2017).

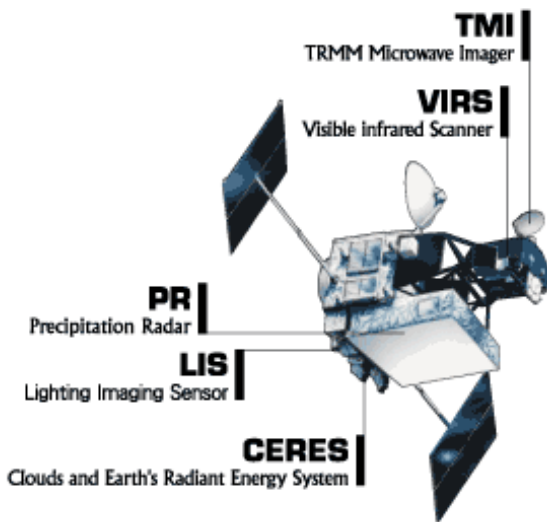
São diversos os produtos de estimativa de chuva resultantes da missão TRMM. Os dados podem ser fornecidos com resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , sobre a banda de latitude  $50^\circ\text{S}$  a  $50^\circ\text{N}$  e em três resoluções temporais diferentes: (1) 3 horas (3B42); (2) diariamente (derivado 3B42); e (3) mensalmente (3B43) (BOVIN e HUFFMAN, 2014).

As estimativas de precipitação produzidas pelo satélite TRMM utilizaram dados coletados por sensores a bordo do satélite TRMM e dados auxiliares coletados por sensores a bordo de outros satélites (HUFFMAN et al., 2007). Os instrumentos transportados pelo TRMM ao longo de sua missão foram: um conjunto três sensores para chuva - TRMM Microwave Imager (TMI), Precipitation Radar (PR) e Visible and Infrared Scanner (VIRS) – e dois instrumentos relacionados – Lightning Imaging Sensor (LIS) e Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) (PMM, 2016).

O instrumento de alta resolução de imagens de micro-ondas (TMI) fornece informações do conteúdo da coluna de precipitação, água líquida em nuvem, gelo em nuvem, intensidade de chuva e tipos de precipitação (estratiforme ou convectiva). O radar de precipitação (PR) mede a distribuição 3D de precipitação sobre os continentes e oceanos e define a profundidade da camada da precipitação. O radiômetro de infravermelho visível (VIRS) fornece observações de alta resolução sobre a cobertura das nuvens, o tipo de nuvem e a temperatura máxima

das nuvens (GES DISC, 2017). A Figura 1 apresenta os instrumentos transportados pelo TRMM 3B42.

Figura 1 - Instrumentos transportados pelo satélite TRMM.



Fonte: GES DISC, 2017.

O conjunto de dados do TRMM se tornou o padrão espacial para medir a precipitação e levou a pesquisas que melhoraram a compreensão da estrutura e evolução de ciclones tropicais, propriedades do sistema convectivo, relações relâmpago-tempestade, modelagem climática e influências antrópicas na precipitação. Os dados também apoiaram aplicações operacionais como monitoramento de inundações e secas e previsão do tempo (BOVIN e HUFFMAN, 2014).

As estimativas de precipitação do protudo TRMM 3B42 são produzidas numa sequência de quatro passos: (1) as estimativas de precipitação de micro-ondas são calibradas e combinadas; (2) as estimativas de precipitação de infravermelho são criadas usando a precipitação de micro-ondas calibradas; (3) as estimativas de precipitação de micro-ondas e infravermelho são combinadas; e (4) o reescalamento para dados mensais é aplicado. Cada campo de precipitação é interpretado como a taxa de precipitação efetiva no tempo de observação nominal (HUFFMAN et al., 2007).

No primeiro passo para obtenção das estimativas de micro-ondas de alta qualidade (HQ), quaisquer dados de micro-ondas disponíveis são

convertidos em estimativas de precipitação e, em seguida, para cada conjunto de dados é feita a média para a resolução espacial de  $0,25^\circ$  durante o intervalo de tempo  $\pm 90$  minutos a partir do tempo de observação nominal. Todas estas estimativas são ajustadas para uma "melhor" estimativa usando a correspondência de probabilidade de histogramas de taxa de precipitação montados a partir de dados coincidentes (HUFFMAN, 2013).

O segundo passo é a utilização da taxa variável de chuva (VAR) e estimativas de infravermelho (IR). O algoritmo 3B42 usa dois conjuntos de dados de IR diferentes para criar o registro completo das grades de  $0,25^\circ$ . Para cada hora, é feita a média dos dados de IR para uma resolução de  $0,25^\circ$  e combinados em arquivos horários de  $\pm 30$  minutos a partir do tempo nominal. Os histogramas de tempo-espaço combinam as taxas de precipitação de HQ e IR, representando cada um na mesma grade de  $0,25^\circ$  a cada 3 horas, acumulando para um mês, e então usados para criar coeficientes de calibração espacialmente variáveis que convertem os dados de IR em taxas de precipitação. Como na HQ, o intervalo de calibração para o IR é de um mês, os ajustes decorrentes são aplicados aos dados do mesmo mês (HUFFMAN, 2013).

O terceiro passo é a combinação das estimativas de HQ e VAR. As estimativas fisicamente baseadas de HQ são tomadas "tal como estão" quando disponíveis e as caixas de grade remanescentes são preenchidas com estimativas VAR. Esse método baseado numa série de tempo que é construída a partir de conjuntos de dados exibindo estatísticas heterogêneas fornece a melhor estimativa local (HUFFMAN, 2013).

O passo final na geração do 3B42 diário é o uso indireto de dados de pluviômetro. Todas as estimativas de HQ + VAR de 3 horas são somadas ao longo de um mês para criar um produto mensal multi-satélite (MS). O MS e o medidor são combinados para criar uma combinação mensal satélite (SG) pós tempo real, que é um produto TRMM por direito próprio (3B43). Em seguida, o campo de relações SG/MS é calculado de modo controlado e aplicado para as escalas de campo a cada 3 horas no mês (HUFFMAN, 2013).

A versão 7 do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) foi lançada em 2012 e diferencia-se da versão 6 pela incorporação de algumas alterações: (1) campos de saída adicionais nos arquivos de dados, incluindo a fonte específica do sensor e os tempos de passagem; (2) satélites adicionais, incluindo as primeiras partes do registro do MHS, todo o registro do SSMIS e abertura para futuros satélites; (3) novo conjunto de dados de temperatura de brilho infravermelho (IR)

para o período anterior ao início do conjunto de dados de IR global combinado (Merged Global IR Dataset) de 4 km do Climate Prediction Center (CPC) (Janeiro de 1998 a Fevereiro de 2000); (4) dados de entrada reprocessados uniformemente usando algoritmos atualizados; (5) utilização de uma única análise de medição de precipitação superficial, processados uniformemente, utilizando algoritmos atuais como os calculados pelo Centro Global de Climatologia por Precipitação (GPCC); e (6) utilização do método de calibração de banda de latitude para todos os satélites (BOVIN e HUFFMAN, 2014).

No intuito de avaliar os desempenhos dos produtos de precipitação pelo satélite TRMM, vários estudos têm sido realizados em diferentes regiões do globo com as versões 6 e 7. Por exemplo, Xue et al. (2013) avaliaram as duas versões do produto TRMM 3B42 (V6 e V7) usando o modelo hidrológico Coupled Routing and Excess Storage (CREST) na bacia montanhosa de Wangchu em Butão no período de 2001 a 2010. Os resultados mostraram que ambos os produtos subestimaram a precipitação na área de estudo, mas a versão 7 do TRMM 3B42 conseguiu corrigir de certa forma a subestimação apresentada pela versão 6, melhorando o desempenho do modelo.

Ochoa et al. (2014) realizaram um estudo em 21 sub-bacias do Pacífico-Andino região entre Equador e Peru utilizando dados de precipitação do TRMM 3B42 V6 e V7 do período de 1998 a 2008. Os resultados mostraram que os produtos do TRMM superestimaram a precipitação nas sub-bacias e melhoram à medida que os dados diários foram agregados em semanas e meses. Além disso, o estudo indicou que a versão 7 do TRMM 3B42 teve melhor desempenho em bacias costeiras e oceânicas, enquanto que em bacias no interior, as diferenças entre as duas versões foram imperceptíveis.

### **2.3.1 Aplicação dos dados do TRMM no Brasil**

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) é a principal instituição responsável pelo gerenciamento da rede de monitoramento e embora existam investimentos por parte da instituição, o país ainda conta com uma escassa e irregular rede pluviométrica (KUREK et al., 2015).

Nesse contexto, alguns estudos estão sendo realizados para validar e avaliar as estimativas de precipitação via satélite no país. Nesse trabalho, será apresentado um resumo de estudos envolvendo os produtos de precipitação do satélite TRMM em diferentes regiões, conforme apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo de estudos que buscaram avaliar os produtos de precipitação estimados pelo satélite TRMM em diversas regiões do Brasil.

Autor	Produto	Local	Ano	Medidas de desempenho
COLLISHONN, B. et al.	TRMM 3B42	Bacia do Rio Paraguai - MT e MS	2007	Erro relativo do volume precipitado e coeficiente de correlação linear
COLLISCHONN, B. et al.	TRMM 3B42	Bacia do Rio Tapajós - AM	2008	Modelo hidrológico de larga escala MGB-IPH (coeficiente de <i>Nasch-Sutcliffe</i> , log coeficiente de <i>Nasch-Sutcliffe</i> e <i>Percent Bias</i> )
FARIAS, S.E.M. et al.	TRMM 3B43 V7	Estado de Góias - GO	2013	Coeficiente de correlação de Pearson
CURTARELLI, M.P. et al.	TRMM 3B42 V6	Bacia do Rio Tocantins - Araguaia até Tucuruí - PA	2013	Coeficiente de correlação linear, erro médio quadrático e <i>Percent Bias</i>
FENSTERSEIFER C.A.	TRMM 3B42 V6 e V7	Bacia do Alto Jucuí - RS	2013	Coeficiente de correlação, erro médio, erro médio quadrático e <i>Nasch-Sutcliffe</i>
OLIVEIRA, P.T.S. et al.	TRMM 3B42 V6 e V7	Cerrado Brasileiro - PR, SP, BA, MT, MS, MG, GO, DF, PI, TO e MA	2014	Coeficiente de correlação linear, erro médio quadrático, <i>Percent Bias</i>
CURTARELLI, M.P. et al.	TRMM 3B43 V7	Reservatório de Itumbiara - MG e GO	2014	Erro absoluto, erro absoluto médio, erro médio quadrático e <i>Percent Bias</i>
KUREK, K.M.K. et al.	TRMM 3B42 V7	Bacia do Rio Guaporé - RS	2015	Modelo hidrológico IPH II e calibração WIN_IPH2 (desvio quadrado inverso e coeficiente de <i>Nasch-Sutcliffe</i> )
SOARES, A.S.D. et al.	TRMM 3B42 V7	Estado da Paraíba - PB	2016	Coeficiente de correlação de Pearson, erro absoluto médio, erro médio quadrático, desvio padrão e <i>Percent Bias</i>

Segundo Collishonn et al. (2008), as estimativas de precipitação do TRMM 3B42 conseguem representar a variabilidade sazonal da bacia do Rio Tapajós - AM e a precipitação apresenta diferenças de forma pontual, mas, quando calculada a média sobre a bacia, os resultados são muito semelhantes aos obtidos a partir de pluviômetros. Para a vazão, o modelo MGB-IPH apresentou melhores resultados de vazão usando os dados de pluviômetros, mas, nos picos de chuva, os dados de satélite tiveram melhor desempenho na simulação da vazão.

Segundo Curtarelli et al. (2013), as estimativas TRMM 3B42 apresentaram uma tendência de superestimar a precipitação nos meses

chuvosos e de subestimação nos meses secos para a bacia do Rio Tocantins - Araguaia até Tucuruí - PA. Em contrapartida, Soares et al. (2016) indicou que no estado da Paraíba houve subestimativa das chuvas nos locais de maior índice pluviométrico e de superestimativa nos locais de menor índice pluviométrico. Outros estudos apontam que as estimativas do TRMM 3B42 tenderam a superestimar a precipitação em escala diária e/ou mensal (COLLISHONN et al., 2007; FARIAS et al., 2013; FENSTERSEIFER C.A., 2013; CURTARELLI et al., 2014; KUREK et al., 2015).

Segundo Oliveira et al. (2014), em termos gerais, no Cerrado brasileiro houve superestimação dos resultados de vazão e a superestimação da precipitação do TRMM 3B42 V6 e V7. Regionalmente, houve a superestimação das chuvas nos estados do Sul e subestimação nos estados do Nordeste e Amazônia. As medidas de desempenho melhoraram com a versão 7 do TRMM 3B42 aumentando o potencial dessa versão para estudos hidrológicos. O estudo também aponta que o cálculo do balanço hídrico usando sensoriamento remoto continua sendo um desafio devido às incertezas nos dados. No entanto, essa abordagem demonstra o potencial para avaliar as tendências dos componentes do balanço hídrico em uma bacia e avaliar as mudanças no balanço hídrico devido às mudanças na cobertura da terra e no uso do solo.

## 2.4 MODELOS HIDROLÓGICOS

O modelo hidrológico é uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados (TUCCI, 1998). Para Lima (2011), a modelagem hidrológica consiste no desenvolvimento de representações matemáticas destinadas a simular processos relativos ao ciclo hidrológico, por exemplo, o processo de infiltração da água no solo e a recarga de aquíferos, ou mesmo o escoamento superficial e a vazão na rede de drenagem.

Na modelagem ambiental, as dificuldades encontradas estão quase sempre relacionadas à própria complexidade do ambiente natural. Sistemas naturais, em escala de bacias, tendem a mostrar grande variação, porém muitos modelos hidrológicos homogeneizam características topográficas, variabilidade dos sedimentos e fontes de perturbação, o que pode acarretar previsões não representativas destes sistemas (BRIGHENTI, 2015).

Ao definir o modelo que será utilizado em um estudo, deve-se ter a clareza dos dados de entrada que serão necessários para sua aplicação, bem como o objetivo e os resultados que esperam ser alcançados (MERRITT et al., 2003). Além disso, os modelos podem deixar de produzir estimativas hidrológicas confiáveis se os dados de entrada não forem de boa qualidade (LI et al., 2015). Assim, como os modelos hidrológicos são representações abstratas e simplificadas dos processos hidrológicos naturais, eles devem ser bem fundamentados na teoria física e empiricamente justificados por trabalhos anteriores (LI et al., 2015).

#### **2.4.1 Análise de sensibilidade, calibração e validação de modelos hidrológicos**

A análise de sensibilidade permite avaliar quanto os resultados dos modelos hidrológicos irão mudar em relação às variáveis ou parâmetros de entrada (MORIASI et al., 2007). É um método fundamental para identificar quais parâmetros têm ou não uma influência significativa sobre as simulações (MA et al., 2000). Nos modelos hidrológicos, especialmente distribuídos e semi-distribuídos, muitos parâmetros precisam ser calibrados. Assim, a análise de sensibilidade é um método existente para reduzir o número de parâmetros destes modelos no processo de calibração (LENHART et al., 2002).

A calibração ou estimativa de parâmetros é o ajuste dos parâmetros do modelo. A análise de sensibilidade realizada de forma semiautomática ou automática permite ao usuário saber quais variáveis da bacia devem ser ajustadas para obter um melhor resultado (ARNOLD et al., 2012). Segundo Arnold et al. (1998), no período de calibração, as entradas do modelo são variadas até um ajuste aceitável ser alcançado, comparando as saídas do modelo para um dado conjunto de condições que foram assumidas inicialmente com os dados observados para as mesmas condições. Nesse trabalho a calibração e análise de sensibilidade foram realizadas com o algoritmo semiautomático Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2) no SWAT-CUP.

O processo de calibração de forma semiautomática ou automática utiliza algoritmos e funções objetivo para calcular as diferenças entre os valores observados e simulados (FRAGOSO Jr. et al., 2009). A função objetivo pode ser definida como uma equação utilizada para medir a distância entre a saída do modelo e os valores observados (GUPTA et al., 1999). Existem diferentes funções objetivo,

as quais são escolhidas de acordo com a finalidade do estudo hidrológico, direcionando a calibração do modelo para aperfeiçoar a simulação dos diferentes elementos do hidrograma, como a recessão ou então as vazões de pico (GUPTA et al., 1999).

Uma vez calibrados os parâmetros do modelo, este pode ser validado para situações semelhantes às que se quer aplicá-lo. Para que essa etapa ocorra, antes de iniciar o processo de calibração, a série temporal de dados medidos deve ser separada em dois períodos, um para a calibração e outro para validação do modelo (ADRIOLO et al., 2008). Os resultados da validação indicam se o modelo é capaz de reproduzir a série de dados não usados em sua calibração. A validação do modelo envolve a execução do modelo usando parâmetros determinados durante o processo de calibração (MORIASI et al., 2007).

Neste trabalho, visto que a série de dados medidos é pequena (2011-2014) e que não está sendo proposto usar o modelo (diretamente) para simulações futuras, mas avaliar se a precipitação estimada por satélite pode ser usada ou não na simulação de vazões da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC optou-se por utilizar toda a série de dados medidos para calibração.

## 2.5 MODELO HIDROLÓGICO - SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo hidrológico semi distribuído baseado na simulação dos processos de transformação chuva-vazão (ARNOLD et al., 1998). O SWAT foi desenvolvido para prever o impacto das práticas de gestão da terra na água, sedimentos e químicos agrícolas em bacias hidrográficas considerando os diferentes tipos e usos do solo (ARNOLD et al., 1998; GASSMAN et al., 2007). Para tanto, essa ferramenta para gestão integrada da bacia hidrográfica opera na escala da bacia hidrográfica em intervalo de tempo diário, é fisicamente baseado, computacionalmente eficiente e capaz de executar simulação contínua dos processos para longos períodos de tempo (GASSMAN et al., 2007).

O modelo conta com o auxílio de um conjunto bastante robusto de dados espaciais como modelo digital de elevação (DEM), uso do solo, tipo de solo e hidrografia em combinação com informações meteorológicas que possibilitam estimar processos hidrológicos que ocorrem na superfície terrestre (MONTEIRO et al., 2015). Também, inclui temperatura do solo e propriedades de nutrientes, pesticidas, plantas, bactérias e patógenos (GASSMAN et al., 2007). Os principais benefícios do modelo são modelagem de bacias hidrográficas que não



possuem dados de monitoramento e quantificação do impacto relativo de dados de entrada alternativos sobre a qualidade da água ou outras variáveis de interesse (ARNOLD et al., 2011).

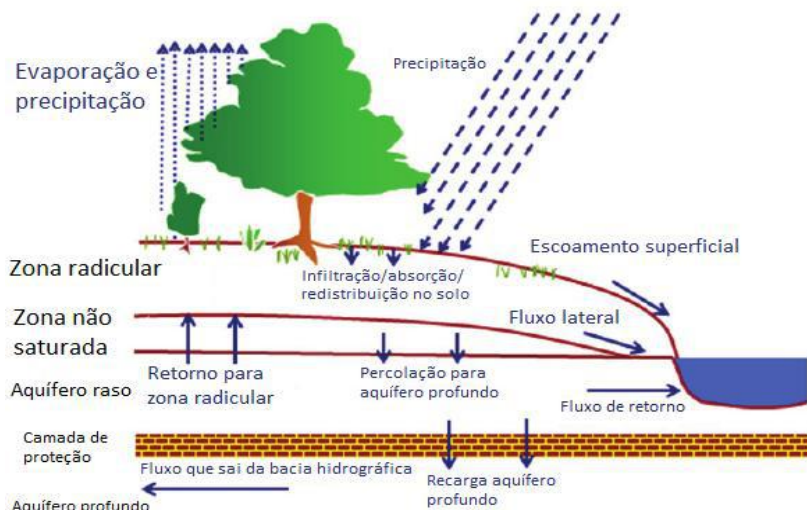
O modelo divide a bacia hidrográfica em várias sub-bacias e depois agrega as regiões que possuem as mesmas características de uso do solo, tipo de solo, topografia e manejo em unidades de resposta hidrológica (HRU) (GASSMAN et al., 2007; ABBASPOUR et al., 2015). A divisão em sub-bacias é vantajosa quando diferentes áreas de uma bacia hidrográfica são dominadas por um uso ou tipo de solo com propriedades muito diferentes capazes o suficiente de impactar na hidrologia. Além disso, através dessa divisão é possível relacionar diferentes áreas de uma bacia hidrológica espacialmente (ARNOLD et al., 2011).

Para cada sub-bacia, o SWAT usa os dados meteorológicos da estação meteorológica mais próxima, isto é, um maior rigor espacial nos dados meteorológicos o que resulta no mesmo número de sub-bacias e de estações meteorológicas (GASSMAN et al., 2007; MONTEIRO et al., 2015). Dessa forma, constitui-se como uma ferramenta flexível para simulação das mais diferentes situações em bacias hidrográficas, desde modelagem hidrológica física através do cálculo de vazões e escoamento de base, até análise de qualidade da água, e produção e transporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas (GASSMAN et al., 2007).

Todo estudo que se deseja realizar no SWAT baseia-se no balanço hídrico, por isso é fundamental que o ciclo hidrológico esteja em conformidade com o que está acontecendo na bacia hidrográfica para que as simulações sejam realizadas com precisão (ARNOLD et al., 2011). O ciclo hidrológico do SWAT (Figura 2) pode ser dividido em duas fases: (1) fase terrestre, responsável por controlar a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas carregados para o canal principal em cada sub-bacia; e (2) a fase de propagação do ciclo hidrológica, definida pelo movimento da água, sedimentos, nutrientes e pesticidas pela rede de drenagem da bacia até o exutório (ARNOLD et al., 2011).

Os processos hidrológicos simulados incluem evapotranspiração, escoamento superficial, infiltração e percolação. No solo os processos incluem: (1) fluxo lateral do solo, fluxo de retorno de aquíferos superficiais e drenagem do solo, que transferem água para o rio; e (2) recarga de aquífero superficial e capilarização do aquífero superficial para a zona radicular e recarga de aquífero profundo, que removem água do sistema (ARNOLD et al., 2011).

Figura 2 - Representação do ciclo hidrológico do SWAT.



Fonte: SWAT Check, 2012.

Primeiramente, o gerador climatológico do SWAT produz a chuva para um dia. A ocorrência de chuva em um dia tem um impacto significativo na umidade relativa, temperatura do ar e radiação solar. Após, temperatura do ar máxima, temperatura do ar mínima, umidade relativa e radiação solar são geradas de acordo com a presença ou não de chuva naquele dia. Por fim, velocidade do vento é gerada.

A precipitação pode ser interceptada pela copa da vegetação ou cair na superfície do solo. Água na superfície do solo irá infiltrar na camada de solo ou escoar superficialmente. O escoamento superficial segue para o canal principal e a água infiltrada pode ficar mantida no solo ou seguir lentamente para o sistema de água superficial através de caminhos subterrâneos (ARNOLD et al., 2011).

O escoamento superficial ocorre sempre que a taxa de aplicação de água na superfície do solo excede a taxa de infiltração. Quando a água é aplicada inicialmente a um solo seco, a taxa de infiltração é geralmente muito alta. No entanto, ela irá diminuir a medida que o solo se torna mais úmido. Assim, quando toda superfície do solo estiver cheia de água, inicia-se o escoamento superficial.

O modelo fornece dois métodos para estimativa do escoamento superficial: o método Curva-Número do *Soil Conservation Service* (SCS, 1972) e o método de infiltração de Green & Ampt (1911). O

procedimento do SCS curva-número foi desenvolvido para fornecer uma base consistente de estimativa da quantidade de escoamento superficial para diferentes condições de uso e tipo de solo.

O Serviço de Conservação dos Recursos Naturais dos Estados Unidos (NRCS, 1996) classifica o solo em quatro grupos hidrológicos de acordo com as características de infiltração de cada solo. Um grupo hidrológico é um grupo de solos que tem potencial similar de escoamento quando submetido à mesma chuva e cobertura. As propriedades do solo que influenciam no potencial de escoamento são: profundidade do lençol freático, condutividade hidráulica saturada e profundidade do solo até uma camada lentamente permeável.

A evapotranspiração é o termo que inclui todos os processos na qual a água da superfície terrestre é convertida em vapor de água. Isso inclui evaporação da copa das plantas, transpiração, sublimação e evaporação do solo. O SWAT disponibiliza três métodos para determinação da evapotranspiração. O método de Penman-Monteith (1965) requer radiação solar, o método de Priestley-Taylor (1972) requer radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa e o método de Hargreaves (1985) o qual requer somente a temperatura do ar. A equação de Penman-Monteith combina componentes que são responsáveis pela energia para sustentar a evaporação, a força do mecanismo necessária para remover o vapor de água e termos de resistência da aerodinâmica e superfície.

A copa das plantas pode afetar significativamente a infiltração, escoamento superficial e evapotranspiração dependendo da densidade de cobertura e morfologia de cada planta. O método curva-número do SCS inclui a interceptação devido à copa das plantas no termo para as abstrações iniciais. Essa variável também inclui o armazenamento e infiltração que ocorrem antes do início do escoamento e é estimada como sendo 20% do valor do parâmetro de retenção para um determinado dia. A percolação ocorre quando a quantidade de água excede a capacidade da camada de solo e a camada abaixo não está saturada.

O escoamento lateral é significativo em solos com uma camada superficial com alta condutividade hidráulica seguido de uma camada semi-impermeável ou impermeável. A precipitação percola verticalmente até encontrar a camada impermeável. A água então forma lagoas acima da camada impermeável formando uma zona de água saturada. Esta zona saturada é a fonte de água para o fluxo subterrâneo lateral. O modelo SWAT incorpora um modelo de armazenamento cinemático para o escoamento sub-superficial desenvolvido por Sloan et

al. (1983) e resumido por Sloan e Moore (1984) baseado na equação do balanço de massa ou balanço de massa líquida onde um segmento em declive é utilizado como volume de controle.

Água subterrânea é água na zona saturada da terra que está sob pressão maior que a atmosférica. O lençol freático é a profundidade na qual a pressão entre a água e a matriz do solo circundante é igual à pressão atmosférica. A água entra no armazenamento de águas subterrâneas principalmente por infiltração/percolação, embora também ocorra recarga por infiltração via corpos de água superficiais. A água deixa o armazenamento de águas subterrâneas por descarga em rios ou lagos, mas também é possível que a água se mova verticalmente no lençol freático até a franja capilar, uma zona acima do lençol freático que está saturada.

Um aquífero é uma unidade geológica que consegue armazenar água o suficiente para transferi-la a uma taxa que seja hidrologicamente significativa. Um aquífero não confinado é um aquífero cujo limite superior é o lençol freático. Um aquífero confinado é um aquífero delimitado abaixo e acima por formações geológicas cuja condutividade hidráulica é muito menor do que a do aquífero. No cálculo da água subterrânea, o SWAT simula dois tipos de aquífero em cada sub-bacia, o aquífero superficial e o aquífero profundo. O aquífero superficial é um aquífero não confinado que contribui para o escoamento de base no canal principal. O aquífero profundo é um aquífero confinado e a água que entra nele contribui para o fluxo em algum lugar fora da bacia hidrográfica.

### **2.5.1 Programa SWAT-CUP**

O SWAT-CUP (Procedimentos de Calibração e Incertezas) é um *software* independente desenvolvido para a calibração e análise de incertezas do SWAT. Os principais objetivos do programa são:

- Integrar vários procedimentos de calibração/análise de incerteza para SWAT em uma interface de usuário;
- Facilitar a aprendizagem do programa para os iniciantes,
- Fornecer uma maneira mais rápida de fazer as operações de calibração e padronização das etapas de calibração;
- Realizar a calibração;
- Adicionar funcionalidades extras para operações de calibração, como criar gráficos de resultados calibrados, comparação de dados, etc.

O programa é constituído de cinco diferentes procedimentos de calibração e análise de sensibilidade: *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2) (ABBASPOUR et al., 2007); *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE) (BEVEN E BINLEY, 1992); *Parameter Solution* (ParaSol) (VAN GRIENSVEN et al., 2006); *Mark chain Monte Carlo* (MCMC) (KUCZERA et al., 1998); e *Particle Swarm Optimization* (PSO) (KENNEDY E BERTHART, 1995). No presente trabalho utilizamos o algoritmo SUFI2 para calibração do modelo e análise de sensibilidade.

No algoritmo SUFI2 pode-se fazer um mapeamento de todas as incertezas a partir de todas as incertezas dos dados de entrada e saída (e.g. dados pluviométricos, uso e tipo do solo e vazão), o qual tenta quantificar a maioria dos dados medidos dentro de 95% da previsão de incertezas (95PPU) em um processo iterativo. O *p-factor* e o *r-factor* são as duas estatísticas utilizadas para quantificar o ajuste entre os resultados da simulação, expressos como 95PPU, e a observação, expressa como um único sinal (com algum erro associado). Qualquer análise que envolva calibração de modelo deve incluir a incerteza no resultado propagando a incerteza do parâmetro (ABBASPOUR, 2015).

A definição final dos valores está diretamente relacionada com a função objetivo escolhida. O SUFI2 permite o uso de onze funções objetivo diferentes: 1) a forma multiplicativa dos erros quadrados; 2) soma dos quadrados dos erros; 3) o coeficiente de determinação ( $R^2$ ); 4) o qui-quadrado ( $\chi^2$ ); 5) coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NS); 6) coeficiente de *Nash-Sutcliffe Modificado* (MNS); 7) coeficiente de determinação  $R^2$  multiplicado pelo coeficiente da linha de regressão ( $bR^2$ ); 8) soma do quadrado residual (SSQR); 9) *Percent Bias* (Pbias); 10) KGE; e 11) RSR.

A função objetivo permite avaliar quanto o modelo é capaz de representar os dados observados. Alguns fatores podem ser considerados na escolha da função objetivo são: (1) complexidade em termos de aplicabilidade a vários constituintes, modelos e condições climáticas; (2) mais comumente usadas, aceitas e recomendadas por trabalhos anteriores; e (3) pontos fortes identificados na avaliação do modelo (MORIASI et al., 2007).

Um modelo pode ser avaliado por métodos estatísticos ou gráficos. Os métodos estatísticos podem ser divididos em três categorias principais: (1) regressão padrão (e.g. coeficiente de correlação de Pearson (R) e coeficiente de determinação ( $R^2$ )); (2) adimensional (e.g. coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NS)); e (3) erro indexado (e.g. valor de *Percent Bias* (Pbias)).

As estatísticas de regressão padrão determinam a resistência da regressão linear entre os dados simulados e observados. As técnicas adimensionais fornecem uma avaliação de avaliação relativa do modelo e os erros indexados quantificam o desvio nas unidades dos dados de interesse. Por sua vez, as técnicas gráficas fornecem uma comparação visual entre os dados simulados e observados que possibilitam uma visão geral do desempenho do modelo (LEGATES e MCCABE, 1999; MORIASI et al., 2007).

Por fim, a análise de sensibilidade dos parâmetros pode ser feita de duas maneiras: análise de sensibilidade global e one-at-a-time. A análise de sensibilidade global é calculada através do sistema de regressão linear múltipla, a qual faz a regressão dos valores gerados pelo hipercubo latino em relação aos da função objetivo. O método do hipercubo latino é utilizado na definição dos valores dos parâmetros onde cada valor de parâmetro selecionado é substituído dentro do projeto do SWAT (ROUHOLAHNEJAD et al., 2012). As importâncias são estimadas pelas alterações médias da função objetivo resultantes das mudanças em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros estão sofrendo alterações. A one-at-a-time mostra a sensibilidade de uma variável se todos os outros parâmetros permanecem constantes. Assim, os valores dos parâmetros fixados influenciam na importância do parâmetro que está mudando (ABBASPOUR, 2015).

Na análise de sensibilidade global, o *t-stat* e o *p-value* são utilizados para identificar a importância relativa de cada parâmetro. O *t-stat* é o coeficiente de um parâmetro dividido pelo seu erro padrão e mostra a precisão com que o coeficiente de regressão foi medido. Se um coeficiente *t-stat* possui um valor muito grande comparado com o seu erro padrão, então provavelmente é diferente de 0 e o parâmetro é sensível. É possível comparar o coeficiente *t-stat* de um parâmetro com a tabela de valores de *Student's t-distribution* e determinar o *p-value*. A *Student's t-distribution* descreve o comportamento esperado da média de uma amostra que possui certo número de observações (ABBASPOUR, 2015).

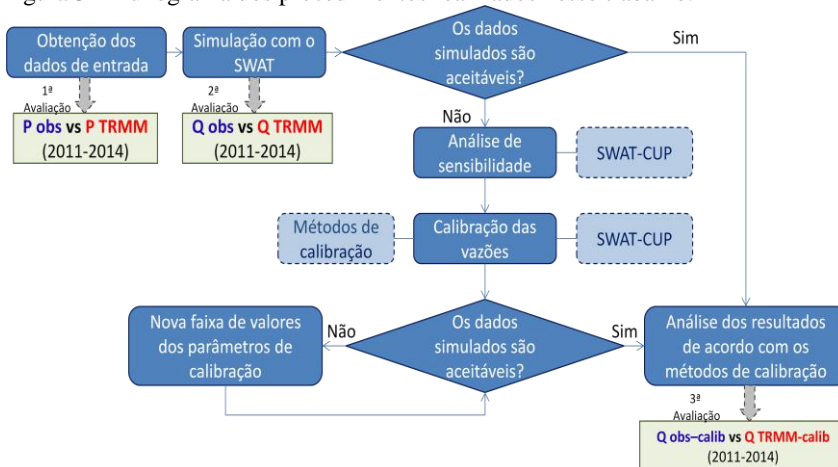
O *p-value* de cada parâmetro testa a hipótese nula de que o coeficiente é igual à zero. Um *p-value* baixo (menor que 0,05) indica que a hipótese nula pode ser rejeitada, ou seja, um parâmetro com baixo *p-value* é provavelmente significativo para o modelo, pois as mudanças no valor do parâmetro estão relacionadas a mudanças na variável de resposta. Inversamente, um alto valor de *p-value* sugere que o parâmetro não é sensível, uma vez que mudanças no valor do parâmetro não estão relacionadas a mudanças na variável de resposta (ABBASPOUR, 2015).

É comumente utilizado um  $p\text{-value} < 0,05$  para rejeitar as hipóteses nulas (quando o coeficiente do parâmetro é diferente de zero). Com um  $p\text{-value}$  de 0,05, há 95% de chance que determinada variável realmente esteja influenciando na simulação e somente 5% de chance que os resultados tenham sido obtidos de uma distribuição aleatória. Dessa forma, na análise de sensibilidade global, quanto maior, em valores absolutos, o valor de  $t\text{-stat}$ , e menor o valor de  $p\text{-value}$ , mais sensível é o parâmetro (ABBASPOUR, 2015).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesse trabalho consiste em calibrar as vazões simuladas a partir dos dados medidos e estimados pelo produto TRMM 3B42 com diferentes funções objetivo. Na Figura 3 são apresentados os procedimentos realizados.

Figura 3 - Fluxograma dos procedimentos realizados nesse trabalho.



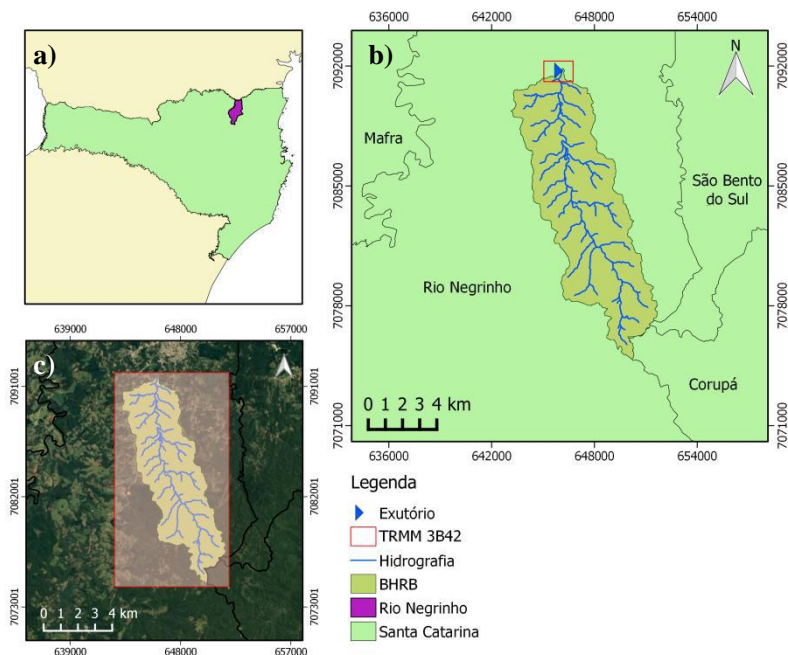
#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica de Rio dos Bugres (BHRB) está localizada no município de Rio Negrinho, região norte do Estado de Santa Catarina, entre as coordenadas UTM 7092134 a 7074604 e 642588 a 652049, referente ao datum SAD 69. A bacia tem uma área de drenagem de 65,21 km<sup>2</sup> e o rio principal é o Rio dos Bugres com comprimento total de 16,64 km. A localização dessa bacia pode ser visualizada na Figura 4.

O clima da região levando em consideração a classificação climática proposta por Köppen é do tipo subtropical mesotérmico úmido com verões amenos (Cfb). A temperatura média do mês mais quente é menor que 22,0°C, a temperatura média anual varia de 15,5 a 17,0°C e a temperatura média das máximas varia de 24,0 a 26,6°C, e das mínimas de 10,8 a 11,8°C. A precipitação total anual pode variar de 1.360 a 1.670 mm e a umidade relativa do ar pode variar de 80,0 a 86,2% (EPAGRI, 2016).



Figura 4 - Localização da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC.



a) localização do município de Rio Negrinho em relação ao estado de Santa Catarina; b) localização da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres (BHRB) em relação ao município de Rio Negrinho, hidrografia e exutório (que representa o ponto de chuva dos dados medidos e dos dados estimados pelo produto TRMM 3B42); e c) georeferenciamento do grid utilizado para obter a chuva a partir do produto TRMM 3B42.

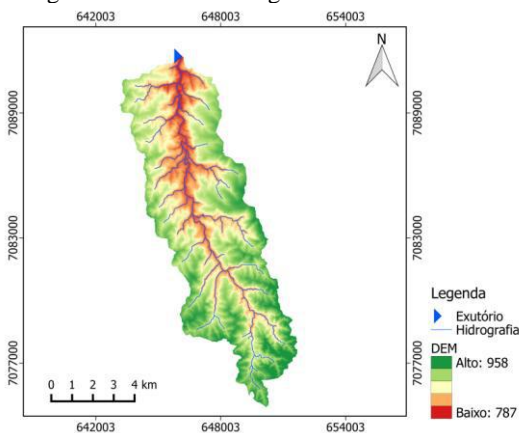
### 3.2 DADOS DE ENTRADA

A simulação no SWAT versão 2012 foi realizada em cima da interface GIS - QGIS e necessitou da consolidação de uma base de dados espaciais (mapas) e temporais (dados diários) de algumas grandezas. Com relação aos dados espaciais foram necessários os seguintes mapas: modelo digital do terreno, tipo de solo e uso do solo. Com relação às séries temporais foram necessários arquivos contendo dados climatológicos diários das seguintes grandezas: temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa e precipitação.

### 3.2.1 Material cartográfico

O Modelo Digital do Terreno (MDT) possui resolução de células de 30 m e foi feito a partir de curvas de nível e pontos cotados presentes na carta topográfica do município de Rio Negrinho - SC, na escala 1:50.000 (MALUTTA, 2012). A partir do MDT, nota-se que a BHRB possui altitude máxima de 787 m e altitude mínima de 958 m, variando 171 m sendo a porção sul da bacia é a parte mais alta (Figura 5).

Figura 5 - Modelo Digital do Terreno (DEM) e hidrografia para a bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - Santa Catarina.



Para composição do mapa de uso do solo foram utilizadas imagens do satélite Landsat/TM-5 fde março de 2010 (Figura 6) (BRIGHENTI, 2015). Cerca de 60% da área da bacia é composta pela Floresta Ombrófila Mista, vegetação típica dos planaltos da região Sul do Brasil. Porém, com a antropização, parte desta vegetação nativa foi retirada para novos usos do solo (ALBERT, 2013). As plantações de pinus caracterizam cerca de 22% da área da bacia e as áreas agrícolas cerca de 10%. A área urbana é cerca de 3% podendo ser considerada de baixa densidade e as pastagens são 3% da área da bacia.

O mapa do tipo de solo (Figura 7) foi elaborado com base no levantamento de solos (escala 1:250.000) realizado pelo Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM) no ano de 2004. A bacia apresenta oito tipos de solos diferentes sendo todos da classe ambissolos. O solo de maior ocorrência

é o Cambissolo Álico Tb A moderado e proeminente (Ca37) ocupando 26,83% da bacia, seguido dos tipos de solos Associação Cambissolo Álico Tb A moderado (Ca23) e Associação Cambissolo Álico Tb A proeminente (Ca51) que ocupam respectivamente 19,88 % e 19,81% da área total da bacia. O tipo de solo Cambissolo Álico Tb A proeminente (Ca47) ocupa 18,7% da área. A Tabela 2 apresenta a sigla, nome, característica e as porcentagens de cada solo presente na bacia.

Figura 6 - Uso e ocupação do solo para a bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - Santa Catarina.

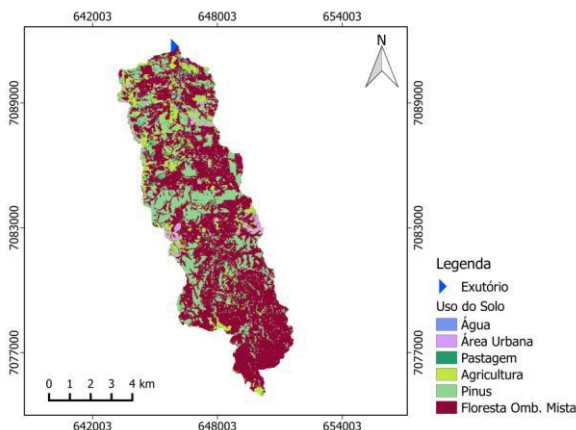


Figura 7 - Tipo de solo para a bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - Santa Catarina.

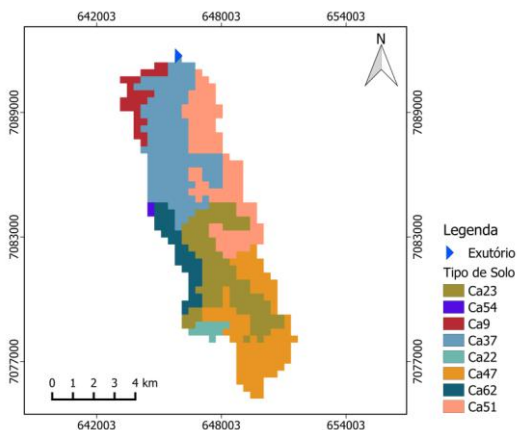


Tabela 2 - Nomenclatura e descrição dos tipos de solo presentes na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - Santa Catarina.

<b>Sigla</b>	<b>Nome</b>	<b>Característica</b>	<b>%</b>
Ca37	Cambissolo Álico Tb A moderado e proeminente	Textura média, fase floresta e campo subtropical, relevo ondulado e forte ondulado.	26,83
Ca23	Associação Cambissolo Álico Tb A moderado	Textura argilosa + Podzólico Bruno-Acinzentado Álico A moderado, textura média/argilosa, ambas as fases floresta subtropical perenifólia, relevo ondulado e forte ondulado.	19,88
Ca51	Associação Cambissolo Álico Tb A proeminente	Textura argilosa, relevo ondulado + Solos Litólicos Álicos A proeminente, textura média, relevo forte ondulado, ambas as fases floresta subtropical perenifólia.	19,81
Ca47	Cambissolo Álico Tb A proeminente	Textura argilosa, fase floresta subtropical perenifólia, relevo forte ondulado.	18,7
Ca62	Associação Cambissolo Álico Tb A húmico	Textura muito argilosa, relevo ondulado + Solos Litólicos Álicos A húmico, textura média, relevo forte ondulado, ambas as fases floresta e campo subtropical.	6,44
Ca9	Cambissolo Álico Tb A moderado	Textura argilosa, fase floresta subtropical perenifólia, relevo suave ondulado e ondulado.	4,6
Ca22	Associação Cambissolo Álico Tb A moderado	Textura argilosa + Podzólico Bruno-Acinzentado Álico A moderado, textura média/argilosa, ambas as fases floresta subtropical perenifólia, relevo suave ondulado e ondulado.	1,79
Ca54	Associação Cambissolo Álico Tb A proeminente	Textura média, relevo ondulado e forte ondulado + Cambissolo Álico latossólico A proeminente, textura média, relevo suave ondulado, ambas as fases floresta subtropical perenifólia.	0,28

### 3.2.2 Dados de precipitação

Os dados de precipitação para a região da bacia hidrográfica de Rio do Bugres foram obtidos da versão 7 do produto TRMM 3B42 para o período de 01/01/2010 a 31/12/2014. O produto TRMM 3B42 diário são estimativas de precipitação de alta qualidade para a região tropical e subtropical do planeta através de dados coletados por sensores a bordo do satélite TRMM e dados auxiliares coletados por sensores a bordo de outros satélites (HUFFMAN et al., 2007).

O produto TRMM 3B42 fornece estimativas de precipitação acumulada em 24 horas (mm/dia) com uma resolução temporal de 3 horas e uma resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  em uma faixa de latitude que se estende  $50^\circ\text{S}$  a  $50^\circ\text{N}$ . A versão 7 do produto TRMM 3B42 diário pode ser obtida gratuitamente através do portal <<http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>>.

De modo a avaliar a versão 7 do produto TRMM 3B42 foi utilizado um banco de dados de medição de precipitação diária e vazão realizado em campo pelo Laboratório de Hidrologia (LabHidro) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A precipitação na bacia foi medida no período de 16/03/2011 a 09/06/14 por um posto pluviométrico. Os dados de precipitação do TRMM 3B42 de 2010 a 2014 e cobrem o mesmo período dos dados observados em campo, sendo que o ano 2010 serviu para aquecimento do modelo. Os dados de vazão observados foram obtidos do trabalho de Grison (2013).

As correlações e comparações da precipitação medida e estimada pelo satélite TRMM foram realizadas com o *software* SigmaPlot. Além da análise das séries diárias, elaboraram-se séries anuais, bem como se agrupou os dados diários em intervalos de médias mensais, com intuito de identificar o comportamento dos dados medidos e estimados nestas situações.

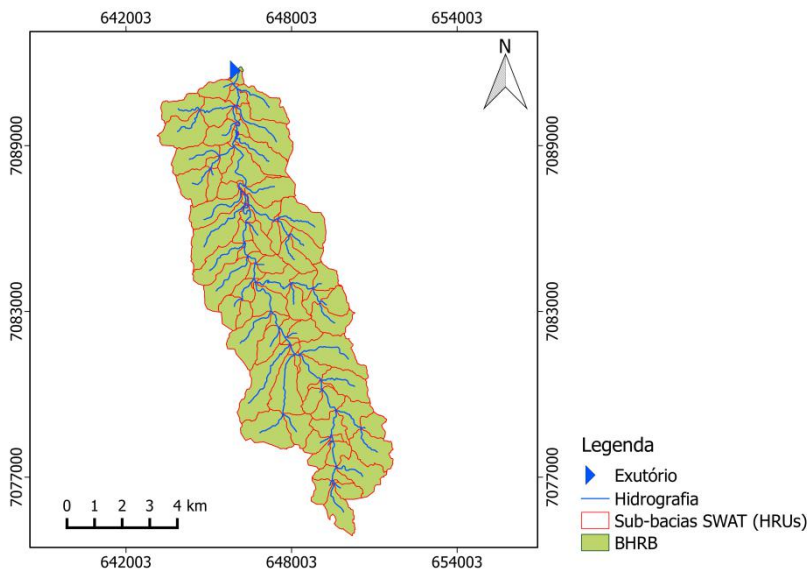
### 3.3 MODELO SWAT

Nas simulações, o modelo hidrológico SWAT divide a área de estudo em sub-bacias, as quais são subdivididas em uma ou mais unidades de resposta hidrológica (HRU), que irão apresentar homogeneidade de uso, tipo de solo e relevo. A subdivisão permite que o modelo retrate as diferenças em evapotranspiração para os diferentes tipos de solo. O escoamento superficial é simulado para cada HRU, determinando caminhos para obter o escoamento superficial total da bacia hidrográfica. As vantagens da subdivisão se refletem no aumento

de precisão do modelo e melhor descrição física do balanço hídrico (ARNOLD et al., 2011).

No presente trabalho a bacia hidrográfica de Rio dos Bugres foi subdividida em 89 sub-bacias sendo que cada sub-bacia corresponde exatamente a uma HRU, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Delimitação das sub-bacias (HRUs) realizada pelo SWAT para a bacia hidrográfica Rio dos Bugres - Santa Catarina.



A simulação do ciclo hidrológico em uma bacia pode ser dividida em duas fases. A primeira fase é a terrestre, responsável por controlar a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas carregados para o canal principal em cada sub-bacia. A segunda é a de propagação do ciclo hidrológico, ou seja, que define o movimento da água, sedimentos, nutrientes e pesticidas através da rede de drenagem da bacia até o exutório. A fase terrestre do ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseado na equação do balanço hídrico apresentada na Equação 2.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gp}) \quad (2)$$

onde,  $SW_t$  é a quantidade final de água no solo (mm),  $SW_0$  é a quantidade inicial de água no solo (mm),  $t$  é o tempo (dias),  $R_{day}$  é a precipitação total diária no dia  $t$  (mm),  $Q_{surf}$  é o escoamento superficial no dia  $t$  (mm),  $E_a$  é a evapotranspiração total diária no dia  $t$  (mm),  $w_{seep}$  é a quantidade de água que entra e é armazenado no solo no dia  $t$  (mm) e  $Q_{gp}$  é a vazão de retorno no dia  $t$  (mm).

### 3.3.1 Escoamento superficial

No SWAT o escoamento superficial pode ser estimado a partir de precipitação diária ou sub-diária. Neste estudo, o escoamento superficial foi estimado a partir de precipitação diária com o método Curva-Número do *Soil Conservation Service* (SCS) (USDA, 1972). O parâmetro Curva-Número (CN) é um método baseado em dados da relação entre a intensidade de chuva, condições da superfície da terra e volume do escoamento superficial, sendo o valor de CN uma função do uso e ocupação do solo, das condições hidrológicas, do grupo hidrológico, permeabilidade e condição inicial de umidade do solo. O valor de CN esta compreendido entre 0 e 100 (valor adimensional), correspondendo a zero para áreas de condutividade hidráulica infinita e cem para áreas totalmente impermeáveis. O método curva-número é apresentado na Equação 3.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (3)$$

onde,  $Q_{surf}$  é o escoamento superficial acumulado (mm),  $R_{day}$  é a quantidade de chuva em um dia (mm),  $I_a$  são valores iniciais de armazenamento superficial, interceptação e infiltração antes do escoamento (mm) e  $S$  é o parâmetro de retenção (mm).

O parâmetro de retenção ( $S$ ) varia espacialmente devido as mudanças do tipo de solo, uso do solo, manejo e declividade e temporalmente em função das alterações no conteúdo de água no solo. O parâmetro retenção é definido pela Equação 4.

$$S = 25,4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

onde, CN é o valor da condição de umidade da Curva-Número para o dia.

Considerando as perdas iniciais (interceptação, infiltração e armazenamento superficial),  $I_a$  pode ser considerado igual a  $0,2S$ , onde o escoamento é 0 se  $R_{day} < I_a$ . Quando  $R_{day} > I_a$  ocorre o escoamento superficial como mostra a Equação 5.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} + 0,8S)} \quad (5)$$

O CN é função da permeabilidade, do uso e da condição inicial de umidade do solo. O USDA - SCS define três condições de umidade antecedentes: I- sem umidade; II - umidade média; e III - úmido. A condição de umidade I é o menor valor diário que a Curva-Número pode assumir em condições sem umidade. As Equações 6 e 7 são utilizadas para o cálculo das condições de umidade  $CN_1$  e  $CN_3$ .

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \cdot (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636 \cdot (100 - CN_2)])} \quad (6)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0.00673 \cdot (100 - CN_2)] \quad (7)$$

onde,  $CN_1$  é condição de umidade I,  $CN_2$  é a condição de umidade II e a  $CN_3$  é a condição de umidade III da Curva Número.

O parâmetro de retenção (S) pode ser calculado por dois métodos: no (1) o parâmetro de retenção pode variar de acordo com a quantidade de água no solo; ou (2) o parâmetro de retenção pode variar de acordo com a evapotranspiração das plantas. Quando o S varia de acordo com a quantidade de água no solo, utiliza-se a Equação 8.

$$S = S_{m\acute{a}x} \cdot \left(1 - \frac{SW}{[SW + \exp(w_1 - w_2 \cdot SW)]}\right) \quad (8)$$

onde, S é o parâmetro de retenção para o dia (mm),  $S_{m\acute{a}x}$  é o valor máximo que o parâmetro de retenção pode assumir no dia (mm), SW é a quantidade de água que pode existir em todo perfil excluindo a quantidade de água existente no ponto de murcha permanente (mm) e,  $w_1$  e  $w_2$  são os coeficientes de forma. O valor de  $S_{m\acute{a}x}$  é calculado resolvendo a Equação 4 utilizando o valor de  $CN_1$ . Os coeficientes de forma  $w_1$  e  $w_2$  são calculados pelas Equações 9 e 10.



$$w_1 = \ln \left( \frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{m\acute{a}x}^{-1}} - FC \right) + w_2 \cdot FC \quad (9)$$

$$w_2 = \frac{\ln \left( \frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{m\acute{a}x}^{-1}} - FC \right) - \ln \left( \frac{SAT}{1 - 2,54 \cdot S_{m\acute{a}x}^{-1}} - SAT \right)}{SAT - FC} \quad (10)$$

onde,  $w_1$  e  $w_2$  são o primeiro e o segundo coeficientes de forma, respectivamente,  $S_3$  é o parâmetro de retenção para o  $CN_3$ ,  $S_{m\acute{a}x}$  é o parâmetro de retenção para o  $CN_1$ ,  $FC$  é a quantidade de água na sua capacidade de campo (mm),  $SAT$  é a quantidade de água quando o solo está completamente saturado (mm) e 2,54 é o valor quando CN é igual a 99.

O valor de CN ajustado de acordo com a condição de umidade existente no dia é calculado rearranjando a Equação 4 e inserindo o parâmetro de retenção calculado para a condição de umidade no dia, conforme mostra a Equação 11.

$$CN = \frac{25400}{(S + 254)} \quad (11)$$

A vazão de pico é a máxima taxa de escoamento superficial que ocorre em um evento de precipitação. É um importante indicador do potencial erosivo de uma precipitação e usada para estimar a perda de sedimentos na bacia. O SWAT calcula a vazão de pico por meio do método racional modificado conforme mostra a Equação 12.

$$Q_{peak} = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad (12)$$

onde,  $Q_{peak}$  é a vazão de pico ( $m^3/s$ ),  $C$  é o coeficiente de escoamento superficial, calculado pela razão entre vazão e precipitação no dia,  $i$  é a intensidade da precipitação (mm/h),  $A$  é a área da sub-bacia ( $km^2$ ) e 3,6 um fator de conversão de unidade.

O tempo de concentração é calculado somando-se o tempo necessário para a água percorrer do ponto mais remoto da bacia até o canal com o tempo necessário para a água se deslocar do ponto mais elevado do canal até o exutório. O tempo de concentração é dado pela Equação 13.

$$t_{conc} = t_{cs} + t_{cc} \quad (13)$$

onde,  $t_{conc}$  é o tempo de concentração na bacia (horas),  $t_{cs}$  é o tempo de concentração do escoamento terrestre (horas) e  $t_{cc}$  é o tempo de concentração do escoamento no canal (horas).

O tempo de concentração do escoamento terrestre calculado pelo SWAT baseia-se nos parâmetros dados pela Equação 14.

$$t_{cs} = \frac{L_{slp}^{0,6} \cdot n^{0,6}}{18 \cdot spl^{0,3}} \quad (14)$$

onde,  $t_{cs}$  é o tempo de concentração do escoamento terrestre na bacia (h),  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning da sub-bacia e  $spl$  é a declividade da sub-bacia (m/m).

O tempo de concentração desenvolvido é apresentado na Equação 15.

$$t_{cc} = \frac{0,62 \cdot L \cdot n^{0,75}}{A^{0,125} \cdot spl_{ch}^{0,375}} \quad (15)$$

onde,  $t_{cc}$  é o tempo de concentração no canal (h),  $L$  é o comprimento do canal deste o ponto mais alto da sub-bacia até o exutório (km),  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal,  $A$  é a área da sub-bacia (km<sup>2</sup>) e  $spl_{ch}$  é a declividade do canal (m/m).

O coeficiente de escoamento é a razão entre a taxa de entrada do escoamento ( $i \cdot \text{área}$ ) e a taxa de descarga máxima ( $q_{peak}$ ), sendo representado pela Equação 16.

$$C = \frac{Q_{surf}}{R_{day}} \quad (16)$$

onde,  $Q_{surf}$  é o escoamento superficial (mm) e  $R_{day}$  é a precipitação do dia (mm).

A intensidade da chuva é a chuva média que cai durante o tempo de concentração, sendo calculada pela Equação 17.

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{conc}} \quad (17)$$

onde,  $i$  é a intensidade da chuva (mm/h),  $R_{tc}$  é a quantidade de chuva que cai durante o tempo de concentração (mm) e  $t_{conc}$  é o tempo de concentração na sub-bacia (horas).

A quantidade de chuva que cai durante o tempo de concentração é proporcional à quantidade de chuva que cai durante um período de 24 horas, conforme a Equação 18.

$$R_{tc} = \alpha_{tc} \cdot R_{day} \quad (18)$$

onde,  $R_{tc}$  é a quantidade de chuva que cai durante o tempo de concentração (mm),  $\alpha_{tc}$  é a fração de chuva que ocorre durante o tempo de concentração e  $R_{day}$  é a quantidade de chuva que cai durante um dia (mm).

O modelo estima a fração que representa o quanto choveu durante o período de concentração ( $\alpha_{tc}$ ) em função da fração de chuva que cai no evento de 30 minutos de maior intensidade, utilizando a Equação 19.

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp[2 - t_{conc} \cdot \ln(1 - \alpha_{0,5})] \quad (19)$$

onde,  $\alpha_{0,5}$  é a fração de chuva que cai na chuva de 30 minutos de maior intensidade e  $t_{conc}$  é o tempo de concentração da sub-bacia (horas).

Após as substituições, o método racional modificado utilizado para estimar a vazão de pico é representado pela Equação 20.

$$Q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot A}{3,6 \cdot t_{conc}} \quad (20)$$

onde,  $\alpha_{tc}$  é a fração de chuva que cai na chuva de 30 minutos de maior intensidade e  $t_{conc}$  é o tempo de concentração da sub-bacia (horas).

### 3.3.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o primeiro mecanismo na qual a água é removida de uma bacia hidrográfica e compreende todos os processos de transformação da água da superfície terrestre em vapor. Isso inclui evaporação da copa das plantas, transpiração, sublimação e evaporação do solo. A copa das plantas pode afetar significativamente a infiltração,

escoamento superficial e evapotranspiração dependendo da densidade de cobertura e morfologia de cada planta. O método curva-número do SCS inclui a interceptação devido à copa das plantas no termo para as abstrações iniciais. Essa variável também inclui o armazenamento e infiltração que ocorrem antes do início do escoamento e é estimada como sendo 20% do valor do parâmetro de retenção para um determinado dia.

O SWAT disponibiliza três métodos para determinação da evapotranspiração: o método de Penman-Monteith (1965), o método de Priestley-Taylor (1972) e o método de Hargreaves (1985). Neste trabalho o método utilizado para o cálculo da evapotranspiração foi o de Penman-Monteith (1965). As variáveis de entrada desse método são a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, conforme apresenta a Equação 21.

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net} - G) + \rho_{ar} \cdot c_p \frac{[e_z^0 - e_z]}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (21)$$

onde,  $\lambda E$  é o fluxo de densidade do calor latente ( $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ ),  $E$  é a altura da taxa de evaporação ( $\text{mm/d}$ ),  $\Delta$  é a declividade da curva de saturação da pressão de vapor com a temperatura,  $H_{net}$  é a radiação líquida ( $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ ),  $G$  é a densidade de fluxo de calor do solo ( $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$ ),  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c_p$  é o calor específico a pressão constante ( $\text{MJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ),  $e_z^0$  é a pressão de saturação do vapor no ar na altitude  $z$  (kPa),  $e_z$  é a pressão de vapor da água no ar na altitude  $z$  (kPa),  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ),  $r_c$  é a resistência total de cobertura (s/m) e  $r_a$  é a resistência total aerodinâmica (s/m).

Após a determinação do potencial de evaporação, o SWAT calcula a evaporação real. Primeiro, o modelo calcula qualquer evaporação resultante da interceptação da copa das plantas. Após, usando uma metodologia proposta por Ritchie (1972), calcula-se a quantidade máxima de transpiração e quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo. Então, a quantidade de sublimação e evaporação resultante do solo é calculada.

### 3.3.3 Água no solo

A água que não é removida do solo pelas plantas ou evaporação pode percolar pela parte inferior do perfil do solo e se transformar em recarga de aquífero ou ainda se mover lateralmente no perfil e contribuir com na vazão. A percolação é calculada para cada camada do solo. Ela ocorre quando uma camada do solo atinge sua capacidade máxima de retenção de água e a camada abaixo não está saturada. A percolação é descrita pelas Equações 22 e 23.

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{se,} \quad SW_{ly} > FC_{ly} \quad (22)$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{se,} \quad SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad (23)$$

onde,  $SW_{ly,excess}$  é a quantidade de água que pode percolar no dia (mm),  $SW_{ly}$  é a quantidade de água existente na camada de solo (mm) e  $FC_{ly}$  é a quantidade de água que a camada de solo pode suportar (mm).

O escoamento lateral é significativo em solos com uma camada superficial com alta condutividade hidráulica seguido de uma camada semi-impermeável ou impermeável. O modelo SWAT utiliza o modelo de armazenamento cinemático para o escoamento sub-superficial desenvolvido por Sloan et al. (1983) e resumido por Sloan e Moore (1984) baseado na equação do balanço de massa líquida onde um segmento em declive é utilizado como volume de controle, conforme a Equação 24.

$$Q_{lat} = 0,024 \left( \frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\Phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (24)$$

onde,  $Q_{lat}$  é a quantidade de água que escoar sub-superficialmente (mm),  $SW_{ly,excess}$  é a quantidade de água que pode percolar no dia (mm),  $K_{sat}$  é a condutividade hidráulica saturada ( $\text{mm.h}^{-1}$ ),  $slp$  é a declividade média da sub-bacia (m/m),  $\Phi_d$  é a porosidade da camada drenável do solo ( $\text{mm.mm}^{-1}$ ) e  $L_{hill}$  é o comprimento da declividade (m).

### 3.3.4 Água subterrânea

No cálculo da água subterrânea, o SWAT simula dois tipos de aquífero em cada sub-bacia, o aquífero superficial e o aquífero profundo. O aquífero superficial é um aquífero não confinado que contribui para o escoamento de base no canal principal. O aquífero profundo é um aquífero confinado e a água que entra nele contribui para o fluxo em algum lugar fora da bacia hidrográfica. O balanço hídrico para o aquífero superficial é realizado conforme a Equação 25.

$$aq_{sh,t} = aq_{sh,t-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (25)$$

onde,  $aq_{sh,t}$  é a quantidade de água armazenada no aquífero superficial em um dia  $t$  (mm),  $aq_{sh,t-1}$  é a quantidade de água armazenada no aquífero superficial em um dia  $t-1$  (mm),  $w_{rchrg,sh}$  é a quantidade de recarga que entra no aquífero superficial em um dia  $t$  (mm),  $Q_{gw}$  é o escoamento subterrâneo ou de base (ou subterrâneo) que entra no canal principal em um dia  $t$  (mm),  $w_{revap}$  é a quantidade de água que se move no solo em resposta a escassez de água em um dia  $t$  (mm) e  $w_{pump,sh}$  é a quantidade de água removida do aquífero superficial por bombeamento em um dia  $t$  (mm).

O escoamento de base somente entra no canal se a quantidade de água armazenada no aquífero superficial exceder um valor limiar especificado pelo usuário ( $aq_{shthr,q}$ ). A resposta do estado estacionário do escoamento de base até a recarga é descrito na Equação 26.

$$Q_w = \left( \frac{8000 \cdot K_{sat}}{(L_{gw})^2} \right) \cdot h_{wtbl} \quad (26)$$

onde,  $Q_w$  é o escoamento subterrâneo no canal principal no dia  $t$  (mm),  $K_{sat}$  é a condutividade hidráulica saturada do aquífero (mm/dia),  $L_{gw}$  é a distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal (m) e  $h_{wtbl}$  é o altura do lençol freático (m).

A Equação 27 apresenta o balanço hídrico para o aquífero profundo.

$$aq_{dp,t} = aq_{dp,t-1} + w_{deep} - w_{pump,dp} \quad (27)$$

onde,  $aq_{dp,t}$  é a quantidade de água armazenada no aquífero profundo em um dia  $t$  (mm),  $aq_{dp,t-1}$  é a quantidade de água armazenada no aquífero profundo em um dia  $t-1$  (mm),  $w_{deep}$  é a quantidade de água que percola do aquífero superficial para o aquífero profundo em um dia  $t$  (mm) e  $w_{pump,dp}$  é a quantidade de água removida do aquífero profundo por bombeamento em um dia  $t$  (mm).

### 3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO COM O SWAT-CUP

O *software* SWAT-CUP foi utilizado na calibração e análise de sensibilidade das vazões simuladas a partir dos dados de precipitação medidos e estimados pelo satélite TRMM através do algoritmo semiautomático *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2).

O SUFI2 utiliza o método do hipercubo latino para definição dos valores dos parâmetros e o processo inicia com uma faixa de valores determinada pelo usuário (ROUHOLAHNEJAD et al., 2012). A identificação da faixa de valor mais comumente utilizada foi feita através de revisão bibliográfica para cada um dos 29 parâmetros usados pelo SWAT nos processos (e.g. escoamento superficial e tempo de concentração, umidade do solo, águas subterrâneas, evapotranspiração e fluxo lateral) que envolvem a solução do balanço hídrico (ver Anexo 01). Em seguida, cada valor do parâmetro selecionado é substituído dentro do projeto do SWAT quantas vezes o usuário achar necessário. Abbaspour et al. (2006) recomenda que o número de simulações seja relativamente grande entre 500-1000.

O passo seguinte é a definição da função objetivo. Nesse trabalho foram usados três coeficientes de desempenho para identificação do ajuste do SWAT: (1) o valor de *Percent Bias* (Pbias); (2) o coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NS); e (3) o coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* Modificado (MNS). Para cada função objetivo foram realizadas no mínimo três iterações. Somente uma função objetivo por vez pode ser usada durante a calibração.

O valor de *Percent Bias* (Pbias) mede a tendência média que os dados simulados têm de serem maiores ou menores que os dados observados. O Pbias é recomendado, pois consegue quantificar erros no balanço hídrico e indicar claramente se um modelo apresenta ou não bom desempenho (MORIASI et al, 2007). O Pbias é representado pela Equação 28.

$$Pbias = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - Q_{s,i})}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i})} \quad (28)$$

onde,  $Q$  é a vazão, sendo que  $m$  se refere ao valor medido,  $s$  ao valor simulado e  $n$  é o número total de observações. O valor ótimo de  $Pbias$  é 0,0. Valores positivos indicam uma subestimação das simulações feitas pelo modelo e valores negativos indicam uma superestimação das simulações do modelo (GUPTA et al, 1999; MORIASI et al, 2007).

O coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NS) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância dos dados simulados em comparação com a variância de dados medidos (MORIASI et al., 2007). O NS é apresentado na Equação 29.

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (29)$$

onde,  $Q$  é a vazão e  $\bar{Q}$  é a vazão média, sendo que  $m$  se refere ao valor medido e  $s$  ao valor simulado. O NS varia entre  $-\infty$  e 1,0, sendo que  $NS=1$  é o valor ótimo. Valores entre 0,0 e 1,0 são valores considerados aceitáveis enquanto que valores menores que 0,0 indicam que o valor médio observado é melhor que o valor simulado, indicando baixo desempenho do modelo.

O coeficiente de *Nash-Sutcliffe Modificado* (MNS) é apresentado na Equação 30.

$$MNS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^p}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^p} \quad (30)$$

onde,  $Q$  é a vazão e  $\bar{Q}$  é a vazão média, sendo que  $m$  se refere ao valor medido e  $s$  ao valor simulado. Se  $p=2$  a equação é de NS, mas se  $p=1$ , a superestimação de um pico é significativamente reduzida. Segundo Legates e McCabe (1999), a forma modificada (MNS) é menos sensível para estimativas de precipitações máximas do que forma quadrática (NS). Sendo assim, MNS é comumente mais utilizado para estimativas de precipitações mínimas e NS é comumente mais utilizado para estimativas de precipitações máximas.

A partir do resultado desses coeficientes, avaliou-se a capacidade do modelo em simular o volume total de vazão, bem como, as vazões



máximas e mínimas verificando se há superestimação ou subestimação das vazões nos períodos analisados. As vazões simuladas em relação às observadas também serão analisadas de forma gráfica. As faixas de valores considerados como bom ajuste ou não do modelo são:  $NS \geq 0,5$  e  $Pbias \leq \pm 25\%$  (MORIASI et al., 2007).

As sensibilidades dos parâmetros foram determinadas através do cálculo do sistema de regressão múltipla, conforme Equação 31, o qual coloca os parâmetros gerados pelo hipercubo latino contra os valores da função objetivo.

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (31)$$

O *t-stat* e o *p-value* são usados para identificar a importância relativa de cada parâmetro  $b_i$ . As importâncias são estimadas pelas alterações médias da função objetivo resultantes das mudanças em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros estão mudando. Foi utilizado um *p-value* < 0,05 para indicar os parâmetros sensíveis na simulação (ABBASPOUR, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

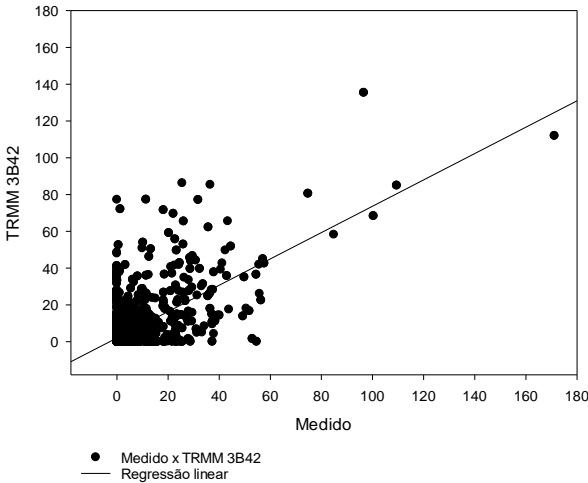
4.1 COMPARAÇÃO DA CHUVA

A primeira análise da chuva considerou a precipitação diária medida e estimada pelo produto TRMM 3B42 de 2011 a 2014. As falhas dos dados medidos são preenchidas automaticamente pelo gerador climatológico automático do SWAT quando os dados são inseridos no modelo. Quando a comparação das séries é feita o coeficiente de determinação apresentou um valor baixo ( $R^2 \approx 0,4$ ) (Figura 9). Ainda, verificou-se que o satélite superestimou a precipitação média anual, havendo uma diferença entre os anos de 186 mm a 504 mm (Tabela 3).

Tabela 3 - Precipitação média anual da sub-bacia decorrente dos dados medidos e estimados no período de 2011 a 2014.

Ano	P <sub>Medida</sub> (mm)	P <sub>TRMM</sub> (mm)	Diferença (mm)	R <sup>2</sup>
2011	1.577,9	2.081,5	-503,5	0,34
2012	1.420,3	1.698,6	-278,3	0,57
2013	1.655,3	1.841,7	-186,3	0,47
2014	1.676,4	1.987,9	-311,4	0,35
Média anual (2011-2014)	1.582,4	1.902,3	-319,9	0,41

Figura 9 - Regressão linear dos dados de precipitação com preenchimento de falhas pelo gerador automático climatológico do SWAT.



Comparando as estatísticas das séries obtidas (Tabela 4), verificou-se uma diferença considerável entre a precipitação média diária e o desvio padrão. A precipitação máxima dos dados medidos em um dia foi de 171,2 mm e para os dados estimados pelo satélite foi de 135,3 mm, ambas ocorreram no mesmo mês (junho de 2014), mas não no mesmo dia. A precipitação média anual da série estimada apresentou uma diferença de 17% em relação a medida, evidenciando a superestimativa do TRMM para volumes mais significativos.

Alguns fatores que podem explicar essa diferença são: tamanho da bacia é menor do que o grid utilizado para obter os dados do TRMM; diferença de escala na medição dos dados em campo e estimados pelo satélite; erros inerentes a medição indireta como métodos utilizados para compilar os dados e gerar a precipitação do produto TRMM 3B42, diferença no horário de passagem do satélite, influência da radiação e temperatura da nuvem; e ainda, preenchimento das falhas dos dados medidos terem sido feitas pelo gerador climatológico automático do SWAT.

Tabela 4 - Estatística descritiva das séries de precipitação médias diárias e total medida e estimada pelo TRMM.

	<b>P<sub>Medida</sub></b>	<b>P<sub>TRMM</sub></b>
P média diária (mm)	4,3	5,2
P média anual (mm)	1.582,4	1.902,3
P máxima (mm)	171,2	135,3
Desvio padrão	11,4	12,7

Foi realizada uma segunda análise, comparando apenas os dias que tiveram medição em campo, sem o preenchimento de falhas (Figura 10), nesse caso, os dados apresentaram um coeficiente de determinação melhor ( $R^2 \approx 0,6$ ). Houve uma diferença da precipitação média anual entre os anos de 21 mm a 214 mm. A precipitação média anual da série estimada apresentou uma diferença de 8% em relação a medida. Para efeito de comparação, a Figura 11 mostra as médias mensais das séries para o segundo caso analisado.

Figura 10 - Regressão linear dos dados de precipitação sem preenchimento de falhas.

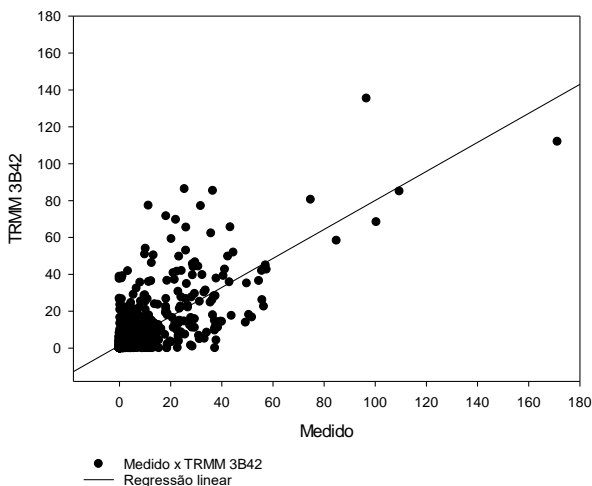
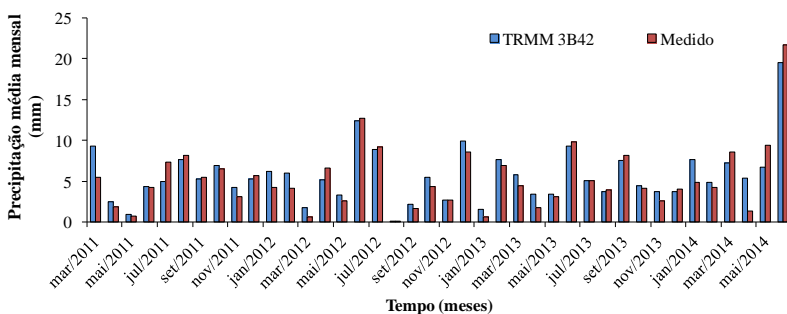


Figura 11 - Comparação da precipitação média mensal dos dados medidos e estimada pelo produto TRMM 3B42 na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC.

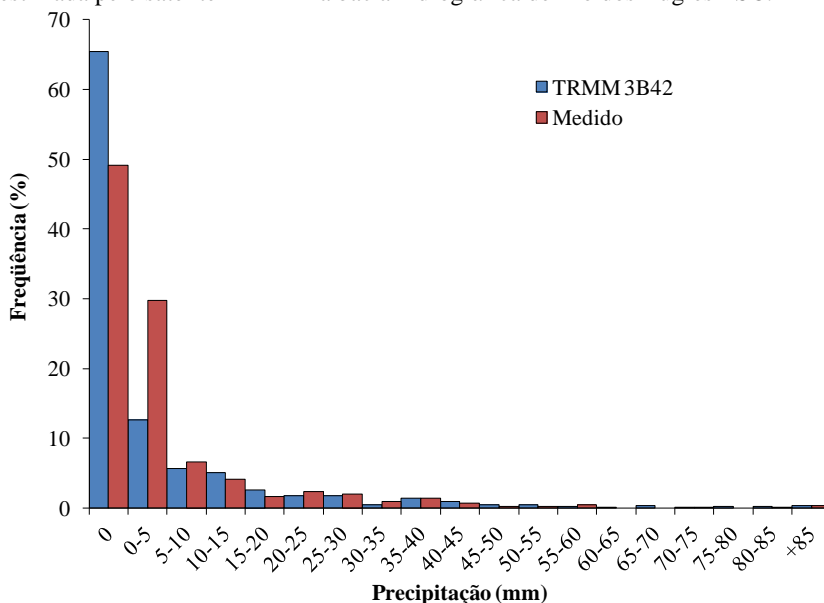


A Figura 11 mostra que, em termos de média mensal, o TRMM consegue estimar a variação da precipitação sobre a bacia considerada. Em alguns picos, o satélite superestimou a precipitação, em outros subestimou. Os resultados obtidos vão de encontro aos apresentados em outros estudos da região sul como de Kurek et al. (2013) para a bacia do Rio Guaporé - RS e Fensterseifer (2013) para a bacia do Alto Jucuí - RS, e outros estudos realizados na região norte como Collischonn et al. (2007) para a bacia do Rio Paraguai - MT, Collischonn et al. (2008) para

a bacia do Rio Tapajós – AM e Farias et al. (2014) para o Estado de Goiás.

Ainda para o segundo caso foi avaliada a frequência da precipitação dos dados medidos em campo e estimados pelo satélite TRMM (Figura 12). Nota-se que a quantidade de dias sem chuva estimados pelo satélite (722 dias ou 65,4% do tempo) é maior que a quantidade de dias sem chuva dos dados medidos (542 dias ou 49,1% do tempo). Por sua vez, os dados medidos registraram mais dias com precipitação entre 0 mm e 5 mm (328 dias ou 29,7% do tempo) do que os dados do TRMM 3B42 (139 dias ou 12,6% do tempo).

Figura 12 - Histograma de frequência da precipitação diária da chuva medida e estimada pelo satélite TRMM na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC.



## 4.2 COMPARAÇÃO DA VAZÃO

A simulação da vazão para os dados de precipitação medidos e os dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM foram realizadas com o modelo SWAT no período de 2011 a 2014, além de um ano de aquecimento do modelo (2010). Como esperado, as primeiras simulações realizadas não foram consideradas satisfatórias, levando a

necessidade de calibração e análise de sensibilidade do modelo. O *software* SWAT-CUP foi utilizado na calibração e análise de sensibilidade das vazões simuladas a partir dos dados medidos e dos dados estimados pelo satélite TRMM através do algoritmo semiautomático *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2).

#### 4.2.1 Análise de sensibilidade

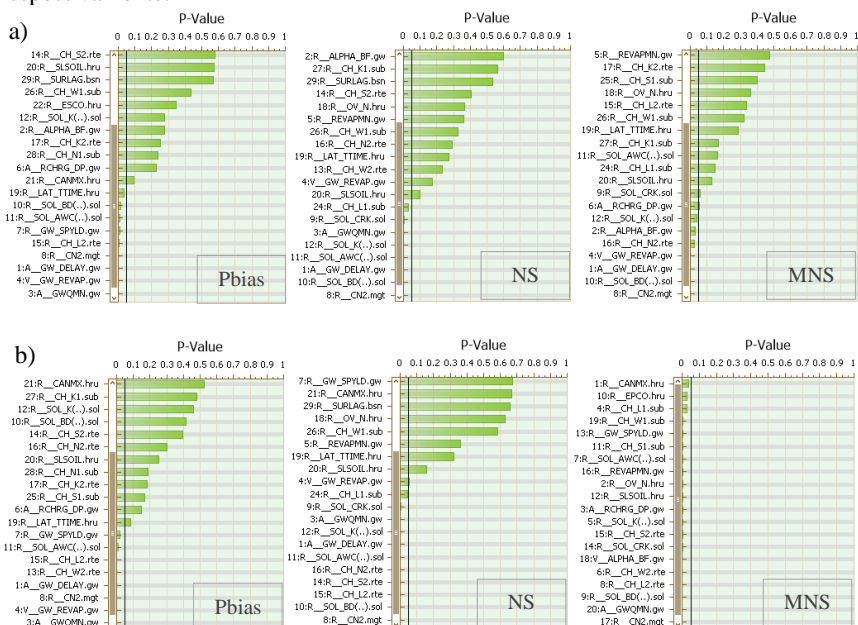
Como já descrito na metodologia, o SWAT baseia-se em 29 parâmetros para a solução do balanço hídrico e a identificação da faixa de valor mais comumente utilizada pelos usuários foi feita através de revisão bibliográfica. Para identificar os parâmetros mais sensíveis na simulação foi usado um valor  $p\text{-value} < 0,05$  (ABBASPOUR, 2015). O  $p\text{-value}$  baixo indica que o parâmetro é significativo a 95% de confiança para o modelo, pois mudanças no valor do parâmetro estão relacionadas a mudanças na variável de resposta. A Figura 13 apresenta o ordenamento dos parâmetros mais sensíveis identificados nas simulações diárias a partir dos dados de precipitação (a) medidos e (b) estimados pelo satélite TRMM para as funções objetivo Pbias, NS e MNS, respectivamente.

A análise de sensibilidade dos dados medidos identificou os seguintes parâmetros mais sensíveis nas simulações diárias: GW\_QMN (profundidade limite do aquífero superficial para que o escoamento superficial inicie), GW\_REVAP (coeficiente de saída da água subterrânea), GW\_DELAY (tempo de atraso para a recarga do aquífero), CN2 (valor inicial do SCS Curva-Número para a condição de umidade II), CH\_L2 (comprimento do rio principal), SOL\_AWC (capacidade de água disponível na camada de solo), SOL\_BD (densidade úmida aparente) e SOL\_K (condutividade hidráulica saturada da primeira camada). O CN2 é um parâmetro-chave do método SCS, sendo que valores altos de CN2 implicam em um aumento no escoamento superficial (BONUMÁ, 2011). Entre as funções objetivo, o indicador de desempenho Pbias teve o maior número de parâmetros influenciando a simulação.

Na análise de sensibilidade dos dados estimados pelo TRMM, os parâmetros mais sensíveis nas simulações diárias são: CN2 (valor inicial do SCS Curva-Número para a condição de umidade II), GW\_QMN (profundidade limite do aquífero superficial para que o escoamento superficial inicie), CH\_L2 (comprimento do rio principal), CH\_W2 (largura média do rio principal), SOL\_AWC (capacidade de água disponível na camada de solo), SOL\_BD (densidade úmida aparente),

GW\_DELAY (tempo de atraso para a recarga do aquífero) e GW\_REVAP (coeficiente de saída da água subterrânea). Entre as funções objetivo, o indicador de desempenho MNS (vazão de base) teve o maior número de parâmetros influenciando a simulação.

Figura 13 - Ordenamento dos parâmetros mais sensíveis identificados nas simulações diárias a partir dos dados de precipitação (a) medidos e (b) estimados pelo satélite TRMM para as funções objetivo Pbias, NS e MNS, respectivamente.



## 4.2.2 Calibração

Os resultados da calibração para o intervalo diário são considerados aceitáveis quando avaliados pelos coeficientes Pbias, NS e MNS, visto que os valores estão dentro da faixa considerada satisfatória ( $NS \geq 0,5$ ,  $MNS \geq 0,5$  e  $Pbias \leq \pm 25\%$ ). Os resultados obtidos sem calibração e após a calibração para as vazões diárias a partir dos dados de precipitação medidos e estimados pelo produto TRMM 3B42 são mostrados na Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente.

Tabela 5 - Valores de Pbias, NS e MNS sem calibração e após a calibração da vazão diária a partir dos dados de precipitação medidos em campo.

Ano	Sem Calibração			Com calibração		
	Pbias	NS	MNS	Pbias	NS	MNS
2011	34,4	0,15	0,19	26,2	0,40	0,38
2012	-31,7	-0,37	0,11	-21,1	0,29	0,16
2013	-14,9	-0,06	0,05	-11,9	0,32	0,23
2014	3,2	0,13	0,15	-0,6	0,31	0,23
Total (2011-2014)	0,0	-0,01	0,13	0,0	0,34	0,27

Tabela 6 - Valores de Pbias, NS e MNS sem calibração e após a calibração da vazão diária para os dados de precipitação do produto TRMM 3B42.

Ano	Sem calibração			Com calibração		
	Pbias	NS	MNS	Pbias	NS	MNS
2011	39,1	-0,22	0,19	31,9	-0,02	0,25
2012	-23,5	-0,18	0,23	-20,1	0,12	0,32
2013	-23,7	-0,41	0,07	-18,5	-0,14	0,22
2014	0,8	-0,14	-0,10	-1,3	-0,12	0,06
Total (2011-2014)	0,3	-0,24	0,13	0,0	-0,04	0,24

A partir da Tabela 5 e Tabela 6 nota-se que o modelo teve dificuldade para obter os resultados dentro da faixa considerada como satisfatória ( $NS \geq 0,5$ ,  $MNS \geq 0,5$  e  $Pbias \leq \pm 25\%$ ), principalmente no ajuste da vazão do TRMM para a função objetivo NS. Em princípio o modelo SWAT, tem melhor avaliação quando se observa os valores do Pbias. Para os dados medidos, com exceção do ano de 2011, todos os outros anos tiveram os valores ajustados do Pbias dentro da faixa aceitável ( $Pbias \leq \pm 25\%$ ) e o modelo tende a subestimar a vazão em 2011 e superestimar de 2012 a 2014 (como pode ser observado na Figura 14a). Para o TRMM, com exceção do ano de 2011, todos os outros anos tiveram os valores ajustados do Pbias dentro da faixa aceitável e o modelo tende a subestimar a vazão em 2011 e superestimar de 2012 a 2014 (conforme pode ser observado na Figura 14b). Esses resultados são esperados visto que a formulação do Curva-Número é usada no cálculo do escoamento superficial. Ainda, como o Pbias prioriza o ajuste do volume das vazões entre dos dados simulados e observados e a simulação foi feita em conjunto para os quatro anos, o Pbias teve um



ótimo resultado no ajuste do volume total da vazão diária em ambos os casos.

Na Figura 14a é possível observar que o modelo conseguiu de maneira razoável simular as vazões para a bacia, onde de 2011 a 2013, a quantidade e a magnitude dos picos simulados foram maiores que os observados e em 2014, a quantidade de picos simulados foi maior porém os picos observados apresentaram maior magnitude. Na Figura 14b, o modelo também apresentou um ajuste razoável na simulação da vazão, onde de 2011 a 2013, a quantidade e a magnitude dos picos simulados foram maiores que os observados e em 2014, a quantidade de picos simulados foi maior porém os picos observados apresentaram maior magnitude. Para ambos os casos, o modelo teve dificuldade em simular os picos de vazão observados de junho a setembro de 2011, evidenciando que pode ter ocorrido problemas de extrapolação da curva-chave nesse período, pois tanto a precipitação medida quanto estimada pelo satélite não foram representativas para simular a vazão observada.

Considerando o coeficiente NS, os resultados para ambos os casos estão fora da faixa aceitável ( $NS \geq 0,5$ ), como já era esperado a calibração com os dados medidos apresentou melhores resultados que a calibração a partir dos dados de satélite, mostrando que os dados medidos conseguiram simular melhor as vazões de pico observadas, sendo a melhor avaliação em 2011. Graficamente, as vazões simuladas para o NS podem ser observadas na Figura 15a e Figura 15b. Na análise do coeficiente MNS, os resultados mostraram que o modelo tende a minimizar as vazões mínimas em alguns períodos, o que pode ser observado na Figura 16a e na Figura 16b. O melhor ajuste do MNS foi dos dados medidos no ano de 2011. De maneira geral, o melhor ajuste a partir dos dados do TRMM ocorreu no ano de 2012.

A influência da escala temporal para o melhor ajuste entre os dados simulados e observados no SWAT já é algo conhecido. Bonumá (2011) utilizou o modelo SWAT na bacia de Arroio Lino - RS, e os resultados indicaram que nas simulações em escala diária, os picos de vazão não foram bem representados e as vazões de base tenderam a ser minimizadas. Isso ocorre devido a incertezas no método da Curva-Número utilizado pelo SWAT para estimar o escoamento superficial para precipitações diárias. Apesar dessas limitações, o modelo SWAT produziu resultados precisos de simulação para escalas de tempo mensais e anuais. Brighenti (2015) aplicou o modelo SWAT na bacia de Rio Negrinho - SC e apontou que os ajustes das calibrações mensais apresentam melhores valores do que as calibrações diárias.

Bons resultados em simulações com intervalos de tempo menores (diários e sub-mensais) foram obtidos por Tobin e Bennett (2013) em estudo realizado em sete bacias hidrográficas nos Estados Unidos. Outros fatores que também podem afetar a qualidade do ajuste do modelo são erros de medidas, escassez de dados de entrada, tamanho da bacia hidrográfica e curto período escolhido para calibração (BONUMÁ, 2011).

Figura 14 - Vazão calibrada para a função objetivo Pbias a partir da precipitação (a) medida e (b) estimada pelo satélite TRMM na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC no período de 2011 a 2014.

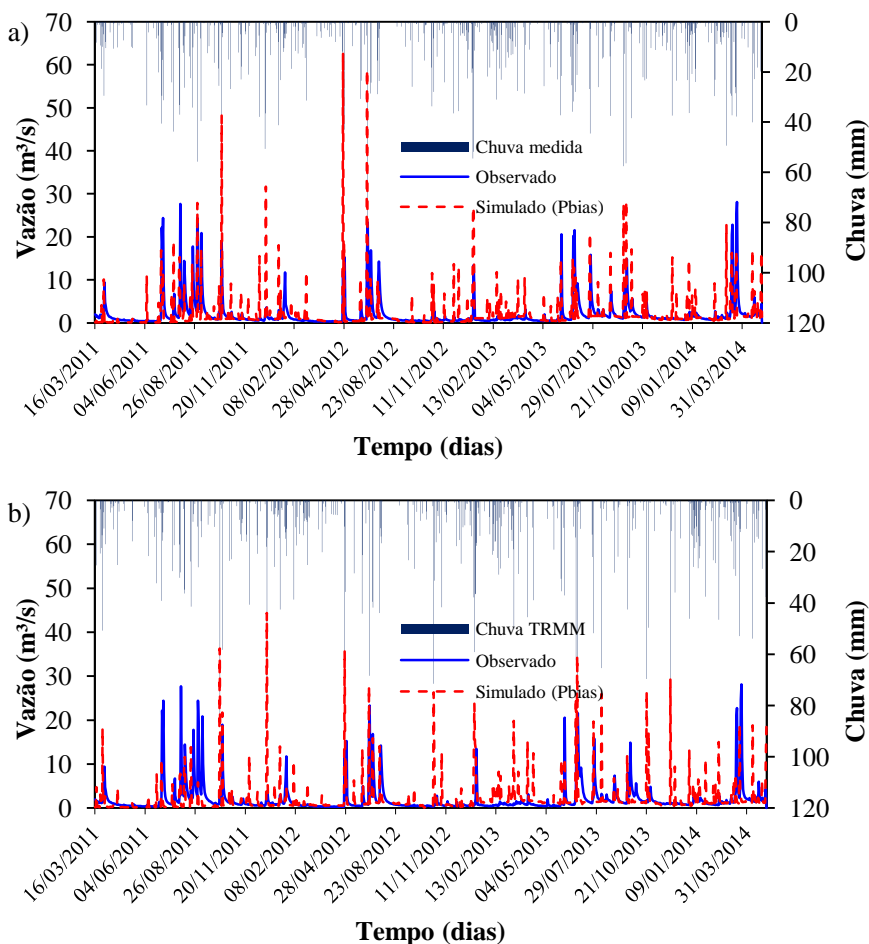


Figura 15 - Vazão calibrada para a função objetivo NS a partir da precipitação (a) medida e (b) estimada pelo satélite TRMM na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC no período de 2011 a 2014.

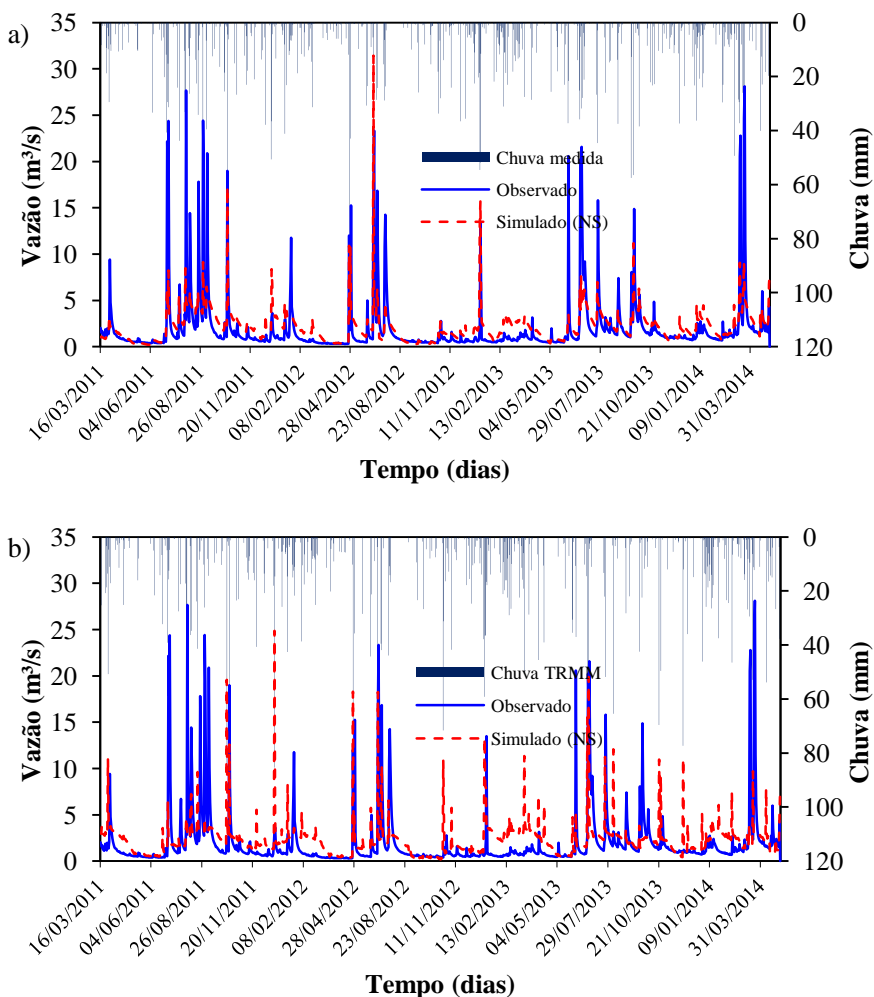
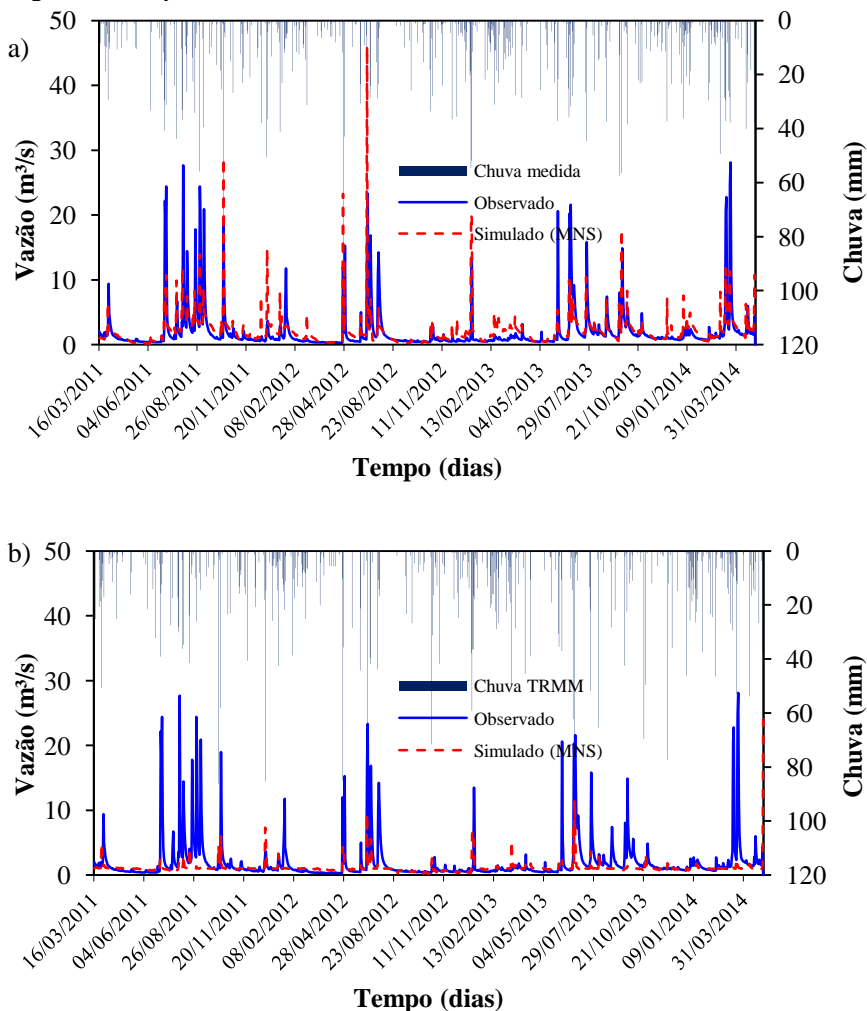


Figura 16 - Vazão calibrada para a função objetivo MNS a partir da precipitação (a) medida e (b) estimada pelo satélite TRMM na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC no período de 2011 a 2014.



O ajuste dos parâmetros é feito sempre em relação a função objetivo escolhida, e o restante dos parâmetros não utilizados na calibração permaneceu com o valor de *default* do modelo. Na Tabela 7 a seguir são apresentados os valores finais dos parâmetros calibrados para a simulação diária dos dados medidos e estimados pelo satélite TRMM. Beven (2001) *apud* Brighenti (2015) discute que podem existir diferentes faixas de valores finais dos parâmetros que possam dar bons resultados para uma mesma bacia hidrográfica, principalmente em modelos cuja quantidade de parâmetros envolvidos nos processos é elevada.

Tabela 7 - Parâmetros e faixa de valores finais obtidos para a calibração diária das simulações diárias com as funções objetivo Pbias, NS e MNS para os dados medidos e os dados estimados pelo satélite TRMM.

Dados medidos											
Pbias				NS				MNS			
M <sup>*</sup>	Parâmetros	Faixa de valores		M	Parâmetros	Faixa de valores		M	Parâmetros	Faixa de valores	
		MIN	MÁX			MIN	MÁX			MIN	MÁX
a <sup>1</sup>	GW_DELAY	-37,0 2	38,01	a	GW_DELAY	-42,42	21,3 4	a	GW_DELA Y	-73,2	13,36
a	GWQMN	-17,4	756,8	a	GWQMN	-393,09	237, 34	r	ALPHA_BF	0,05	0,07
v <sup>3</sup>	GW_REVAP	0,08	0,18	r	GW_SPYLD	-0,77	-0,39	v	GW_REVA P	0,12	0,21
r <sup>2</sup>	GW_SPYLD	0,26	0,97	r	CN2	-0,38	-0,23	r	CN2	-0,18	-0,05
r	CN2	0,02	0,12	r	SOL_CRK	-0,14	-0,02	r	SOL_BD	0,14	0,42
r	SOL_BD	0,42	-0,14	r	SOL_BD	0,24	0,32	r	SOL_K	-0,16	-0,02
r	SOL_K	-0,18	-0,02	r	SOL_AWC	-0,01	0,02	v	CH_N2	0,11	0,19
r	CH_L2	0,08	0,3	r	CH_L1	0,03	0,13				
v	LAT_TTIME	24,6 9	61,15								

Dados do satélite TRMM											
Pbias				NS				MNS			
M	Parâmetros	Faixa de valores		M	Parâmetros	Faixa de valores		M	Parâmetros	Faixa de valores	
		MIN	MÁX			MIN	MÁX			MIN	MÁX
a	GW_DELA Y	8,58	85,77	a	GW_DELA Y	45,2 7	3,78	r	CANMX	-0,09	0,01
a	GWQMN	-3,61	1.989,61	a	GWQMN	267, 26	1.115, 17	r	OV_N	0,05	0,12
v	GW_REVA P	0,11	0,28	r	CN2	-0,25	-0,08	a	RCHRG_D P	0,00	0,04
r	GW_SPYL D	-0,06	0,82	r	SOL_CRK	-0,05	0,05	r	CH_L1	-0,16	-0,01
r	CN2	-0,06	0,05	r	SOL_BD	0,06	0,20	r	SOL_K	-0,22	-0,08
r	SOL_AWC	-0,11	0,03	r	SOL_AWC	0,04	0,16	r	CH_W2	0,03	0,11
r	CH_W2	0,29	0,00	r	SOL_K	-0,05	0,12	r	SOL_AWC	-0,04	0,03
r	CH_L2	-0,01	0,28	r	CH_S2	0,05	0,20	r	CH_L2	-0,33	-0,15
				r	CH_L2	0,06	0,23	r	SOL_BD	0,20	0,35
				v	CH_N2	0,06	0,17	r	EPCO	-0,23	-0,10
				r	CH_L1	0,04	0,19	r	CH_S1	-0,15	-0,05
								r	SLSOIL	-0,04	0,04
								r	GW_SPYL D	-0,30	0,03
								r	SOL_CRK	-0,01	0,14
								r	CH_S2	0,13	0,23
								r	REVAPMN	0,07	0,11
								r	CN2	-0,29	-0,14
								r	ALPHA_B F	0,61	0,95
								r	CH_W1	-0,08	0,01
								a	GWQMN	199, 77	1.178, 71

\* Método

<sup>1</sup> Absoluto: o valor calibrado é adicionado ao valor do parâmetro existente;

<sup>2</sup> Relativo: o valor de parâmetro existente é multiplicado por 1 mais o valor calibrado;

<sup>3</sup> Substituir: o valor do parâmetro é substituído pelo valor calibrado.

### 4.2.3 Curvas de permanência

Curva de permanência é outro método disponível para avaliação visual de vazões. Consiste na distribuição de vazões em um intervalo de tempo definido (e.g. diário, mensal e anual) que representa a relação entre a magnitude e frequência com que essas vazões são igualadas ou superadas em um dado período (BRIGHENTI, 2015).

A Figura 17 apresenta as curvas de permanência calibradas para as funções objetivo Pbias, NS e MNS apresenta as curvas de permanência em escala logarítmica das vazões calibradas na BHRB para as funções objetivo Pbias, NS e MNS a partir das vazões simuladas a) dos dados medidos e b) dos dados estimados pelo satélite TRMM no período de 2011 a 2014.

Considerando a calibração pela função objetivo Pbias, percebe-se que nos dois casos, a quantidade e a magnitude dos picos simulados é maior que os observados, onde para a vazão a partir dos dados medidos o valor máximo simulado é  $63 \text{ m}^3/\text{s}$  e o observado é  $28 \text{ m}^3/\text{s}$  (como é possível verificar na Figura 14a) e para a vazão a partir dos dados estimados pelo satélite TRMM o valor máximo simulado é  $44 \text{ m}^3/\text{s}$  e o observado é  $28 \text{ m}^3/\text{s}$  (como é possível verificar na Figura 14b). Na análise da curva do Pbias em escala logarítmica, identifica-se um problema na simulação das vazões mais baixas, onde os modelos apresentaram uma tendência de subestimar as vazões.

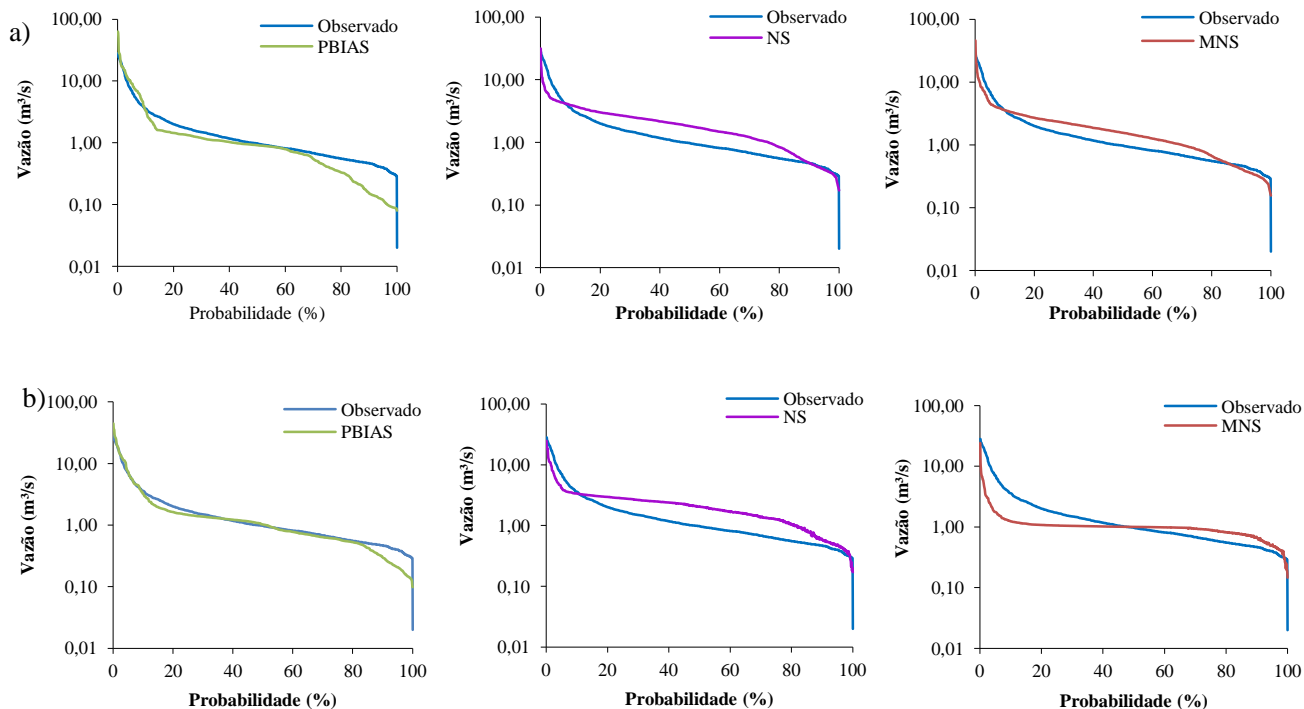
Na análise da função objetivo NS, percebe-se que para os dados medidos a quantidade e a magnitude dos picos simulados é maior que os observados, onde para a vazão a partir dos dados medidos o valor máximo simulado é  $31 \text{ m}^3/\text{s}$  e o observado é  $28 \text{ m}^3/\text{s}$  (como é possível verificar na Figura 15a). Para a vazão a partir dos dados estimados pelo satélite os dados observados apresentarem maior magnitude, onde o valor observado é  $28 \text{ m}^3/\text{s}$  e o valor simulado é  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  (como é possível verificar na Figura 15b). Porém a quantidade de picos simulados é maior que os observados. Quando analisamos a curva do NS na escala logarítmica, para os dados medidos entre 0% e 10% do tempo e entre 85 e 100% do tempo, as vazões observadas superam as simuladas, e entre 10 e 85% do tempo, as vazões simuladas superam as observadas. Para o TRMM, observa-se que entre 0% e 10% do tempo as vazões observadas são superadas pelas simuladas. Enquanto que entre 10 e 100% do tempo as vazões simuladas superam as observadas.

Para a função objetivo MNS, percebe-se que para os dados medidos a quantidade e a magnitude dos picos simulados é maior que os observados, onde para a vazão a partir dos dados medidos o valor

máximo simulado é  $46 \text{ m}^3/\text{s}$  e o observado é  $28 \text{ m}^3/\text{s}$  (como é possível verificar na Figura 16a). Para a vazão a partir dos dados estimados pelo satélite a magnitude dos picos observados é maior que os simulados, onde o valor máximo observado é  $28 \text{ m}^3/\text{s}$  e o simulado é  $24 \text{ m}^3/\text{s}$  (como é possível verificar na Figura 16b). Quando analisamos a curva do MNS na escala logarítmica, para os dados medidos entre 10% e 80% do tempo, as vazões simuladas superam as observadas. Para o TRMM observa-se que entre 0% e 40% do tempo as vazões observadas são superadas pelas simuladas. Enquanto que entre 40 e 100% do tempo as vazões simuladas superam as observadas.



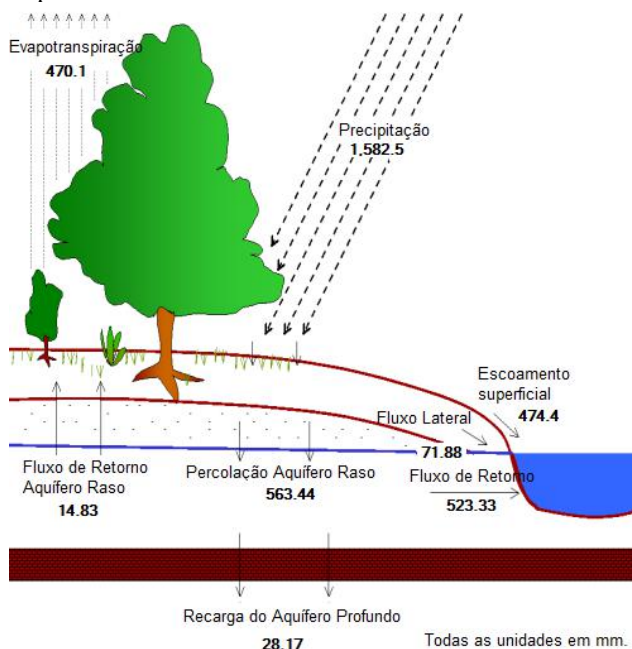
Figura 17 - Curvas de permanência em escala logarítmica das vazões calibradas na BHRB para as funções objetivo Pbias, NS e MNS a partir das vazões simuladas a) dos dados medidos e b) dos dados estimados pelo satélite TRMM no período de 2011 a 2014.



### 4.3 BALANÇO HÍDRICO

Um dos importantes resultados da simulação do SWAT é a quantificação das variáveis envolvidas no balanço hídrico. A Figura 18 e a Figura 19 apresentam o balanço hídrico anual médio de 2011 a 2014 para a bacia hidrográfica do Rio dos Bugres utilizando dados de precipitação diários medidos em campo. A precipitação média anual com os dados dos pluviômetros é de 1.582 mm. A evapotranspiração real e a vazão são equivalentes a 30% e 68% do total de chuva que chega a bacia. A percolação é 36%, porém apenas 0,2% chegam como recarga ao aquífero profundo. O escoamento superficial e o fluxo de retorno são equivalentes a 44% e 56% da vazão total.

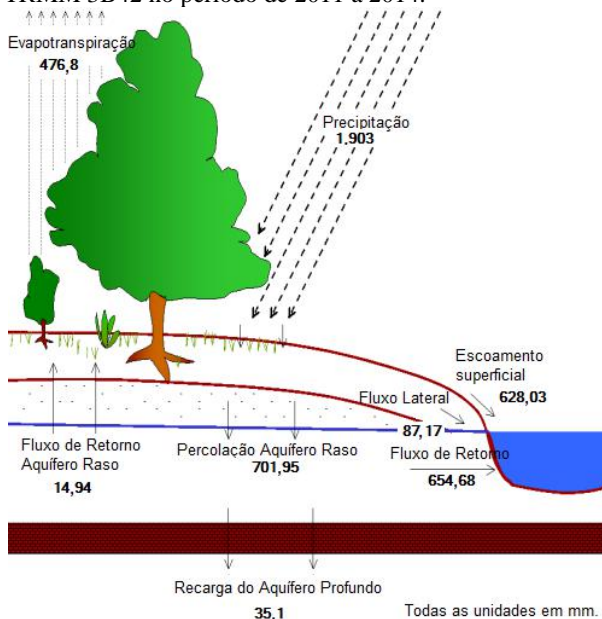
Figura 18 - Demonstração dos valores envolvidos no balanço hídrico anual médio da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC utilizando dados medidos no período de 2011 a 2014.



A Figura 19 apresenta o balanço hídrico anual médio de 2011 a 2014 para a bacia hidrográfica do Rio dos Bugres utilizando dados de precipitação diários estimados pelo produto TRMM 3B42. A precipitação média anual com os dados do satélite é de 1.903 mm. A

evapotranspiração real e a vazão são equivalentes a 25% e 72% do total de chuva que chega a bacia. A percolação é 37%, porém apenas 0,2% chegam como recarga ao aquífero profundo. O escoamento superficial e o fluxo de retorno são equivalentes a 46% e 54% da vazão total.

Figura 19 - Demonstração dos valores envolvidos no balanço hídrico anual médio da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC utilizando o produto TRMM 3B42 no período de 2011 a 2014.



Em uma avaliação do desempenho do modelo, a parcela de precipitação que é convertida em evapotranspiração, fluxo lateral, fluxo de retorno, escoamento superficial, percolação para o aquífero raso e recarga do aquífero profundo são bem similares para os dois casos analisados. A análise hidrológica do balanço hídrico sugeriu que o fluxo de retorno é um componente importante do rendimento total da água na área de estudo que contribui mais do que o escoamento superficial.

Comparando os balanços hídricos obtidos, houve uma superestimação do escoamento superficial do satélite, devido principalmente à superestimativa de 17% da precipitação média anual do TRMM. Os resultados apontam que a evapotranspiração média anual aumentou pouco cerca de 7 mm (1,4%) enquanto que a água disponível para percolação aumentou em torno de 138 mm (20%), fluxo lateral em

torno de 15 mm (18%) e escoamento superficial em torno de 153 mm (24%).

Oliveira et al. (2014) também utilizou dados de precipitação do produto TRMM 3B42 V7 e obteve as mesmas características de resultados para o balanço hídrico na região do Cerrado brasileiro. Ainda, Bonumá (2013) utilizou o modelo SWAT na avaliação do balanço hídrico na bacia do Rio Preto - SC, que apresenta características de uso e tipo de solo semelhantes a bacia deste estudo, e indicou resultados semelhantes aos obtidos nesse estudo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas comparações da chuva entre os dados medidos de chuva e os dados do satélite, os dados de satélite tendem a superestimar a precipitação na BHRB quando comparado com os dados medidos em 17%. Isso pode ser explicado pelo fato do tamanho da bacia ser menor do que o grid utilizado para obter os dados do TRMM, diferença de escala na medição entre os dois tipos de dados, erros inerentes a medição indireta ou ainda, preenchimento das falhas dos dados medidos terem sido feitas pelo gerador climatológico automático do SWAT.

Com relação à vazão, o modelo teve sucesso no ajuste do volume das vazões diárias, representado pelo Pbias. Porém, teve dificuldade no ajuste para as funções objetivo NS (vazões de pico) e MNS (vazões de base). Mesmo com a tendência de superestimação dos dados de satélite, nos meses entre junho a setembro de 2011, notou-se que os picos de vazão observados não foram bem representados, o fato pode estar associado a problemas de extrapolação da curva-chave e não exclusivamente as medições de cota-vazão ou chuva.

A análise de sensibilidade dos dados medidos e estimados pelo satélite identificou o CN2 como o parâmetro mais sensível nas simulações, visto que toda formulação no cálculo do escoamento superficial é baseado nele. Outros parâmetros identificados foram o GW\_QMN, GW\_REVAP, GW\_DELAY que influenciam no cálculo das águas subterrâneas, o CH\_L2 e CH\_W2 que influenciam no cálculo do escoamento superficial e tempo de concentração e o SOL\_AWC, SOL\_BD e SOL\_K que influenciam na umidade do solo. Por fim, a avaliação do balanço hídrico indicou que o modelo SWAT é capaz de produzir estimativas confiáveis para os diferentes componentes do ciclo hidrológico a partir dos dados de precipitação medidos e estimados pelo satélite TRMM.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que seja testada uma nova simulação e calibração da vazão com o modelo SWAT considerando o preenchimento das falhas da precipitação medida com os dados de precipitação estimados pelo produto TRMM 3B42. Também recomenda-se o teste dos dados provenientes de satélite em bacias com uma série maior de dados observados para que seja realizada a validação dos dados e simulações em escala de tempo mensal ou anual. Bem como, a consideração da análise de incerteza dos dados do modelo (entrada e saída), de forma a proporcionar maior confiabilidade nas simulações realizadas.

## REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI. M.; HAGHIGHAT, S. **SWATCUP calibration and uncertainty programs for SWAT**. In: Proc. Intl. Congress on Modelling and Simulation. p.1603-1609, 2007.
- ABBASPOUR, K. C. et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal Of Hydrology**, v.333, n.2-4, p.413-430, 2007. Elsevier BV.
- ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal Of Hydrology**, v.524, p.733-752, 2015. Elsevier BV.
- ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual**. Eawag. 2015.
- ADRIOLO, M. V. et al. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. **VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas**, Belo Horizonte-MG, 2008.
- ALBERT, T. C. **Estudo hidrossedimentológico em três bacias embutidas no município de Rio Negrinho - SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2013. 102 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Evolução da rede hidrometeorológica nacional**. ANA, Brasília (2007).
- ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development. **Journal of The American Water Resources Association**, v.34, n.1, p.73-89, 1998. Wiley-Blackwell.
- ARNOLD, J. G. et al. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. **Journal of Hydrology**, v.227, p.21-40, 2000.
- ARNOLD J. G. et al. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009**. Texas Water Resources Institute. Grassland : Soil and Water Research Laboratory. 2011. 647 p.

BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models – model calibration & uncertainty prediction. **Hydrological Process**, v.6, n.3, p.279–298, 1992. Wiley-Blackwell.

BRIGHENTI, T. M. **Modelagem hidrológica e avaliação de diferentes métodos de calibração para o modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2015. 119 p.

BONUMÁ, N. B. **Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no sul do Brasil**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos físicos e morfogenéticos do solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS. 2011. 136 p.

BONUMÁ, N. B. et. al. Estimativa do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica com o modelo SWAT. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves–RS, p.1-8, 2013.

BOVIN, D. T.; HUFFMAN, G. J. **TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation**. 2014. Disponível em: <[ftp://meso-a.gsfc.nasa.gov/pub/trmmdocs/3B42\\_3B43\\_doc.pdf](ftp://meso-a.gsfc.nasa.gov/pub/trmmdocs/3B42_3B43_doc.pdf)>. Acesso: 20 nov. 2016.

CARDOSO, A. T. **Estudo hidrossedimentológico em três bacias embutidas no município de Rio Negrinho - SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC. 2013. 102 p.

CHAPPELL, A. et al. Evaluating geostatistical methods of blending satellite and gauge data to estimate near real-time daily rainfall for Australia. **Journal Of Hydrology**, v.493, p.105-114, 2013. Elsevier BV.

COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. **Journal Of Hydrology**, v.360, n.1-4, p.207-216, 2008. Elsevier BV.

COLLISCHONN, B. et al. Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai Superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.1, n.59, p.93-99, 2007.

CURTARELLI, M. P.; RENNÓ, C. D.; ALCÂNTARA, E. H. Evaluation of the Tropical Rainfall Measuring Mission 3B43 product over an inland area in Brazil and the effects of satellite boost on rainfall estimates. **Journal Of Applied Remote Sensing**, v.8, n.1, p.1-14, 2014. SPIE-Intl Soc Optical Eng.

CURTARELLI, M. P. et al. Avaliação do produto TRMM 3B42 diário sobre a Região Hidrográfica do Tocantins - Araguaia até o reservatório de Tucuruí - PA. **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu-PR, p.5816-5823, 2013.

DAVIE, T. **Fundamentals of Hydrology**. 2. ed. New York: Taylor & Francis e-Library, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E DE EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA (EPAGRI). **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico de Santa Catarina**. Disponível em: < <http://www.ciram.epagri.sc.gov.br/>>. Acesso em 05 de novembro de 2016.

FARIAS, S. E. M. de et al. Avaliação das Estimativas de Precipitação do satélite TRMM para o Estado de Goiás: uma abordagem climatológica. **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu-PR, p.1938-1944, 2013.

FEKETE, B. M. et al. Uncertainties in Precipitation and Their Impacts on Runoff Estimates. **Journal Of Climate**, v.17, n.2, p.294-304, 2004. American Meteorological Society.

FENSTERSEIFER, C. A. **Qualidade das estimativas de precipitações derivadas de satélites na bacia do Alto Jacuí-RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS. 2013. 126 p.

FRAGOSO Jr., C.R.; FERREIRA, T.F.; MARQUES, D.M. **Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos**. São Paulo: Oficina Textos. 2009. 304 p.



FLORENZANO, T. G. **Os satélites e suas aplicações**. São José dos Campos: SindCT, 2008. 52 p.

FREIRE, C. C; OMENA, S. P. F. de. **Princípios de hidrologia ambiental**. Curso de aperfeiçoamento em Gestão de Recursos Hídricos [modalidade a distância]. CTHidro, 2005.

GARCEZ, L. N. **Hidrologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1967. 249 p.

GASSMAN, P. W. et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **American Society Of Agricultural And Biological Engineers**, v.50, n.4, p.1211-1250, 2007.

GRISON, F. Estudo da geometria hidráulica do rio dos bugres, no município de rio negrinho - SC. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2013. 242 p.

GODDARD EARTH SCIENCES DATA AND INFORMATION SERVICES CENTER (GES DISC). **TRMM**. Disponível em: <<https://disc.gsfc.nasa.gov/TRMM>>. Acesso: 15 mar. 2017.

GUPTA, H.V.S.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P.O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal Of Hydrologic**, v.4, n.2, p.135-143, 1999.

HUFFMAN, G. J. et al. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. **Journal Hydrometeor**, v.8, n.1, p.38-55. 2007.

HUFFMAN, G. J. **Algorithm 3B42: TRMM Merged HQ/Infrared Precipitation**. TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission. 2013. Disponível em: <<https://trmm.gsfc.nasa.gov/3b42.html>>. Acesso: 20 fev. 2017.

KENNEDY, J. E.; EBERHART, R.C. **Swarm Intelligence**. In. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. p.1942-1948, 1995.

KUCZERA, G.; PARENT, E. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. **Journal of Hydrology**, v.211, n.1, p.69–85, 1998.

KUREK, R. K. M.; TASSI, R.; PICCILLI, D. G. A. Aplicabilidade da precipitação estimada pelo satélite TRMM na modelagem chuva-vazão: uma análise na sub-bacia do Rio Guaporé/RS. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília-DF, p.1-8, 2015.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v.35, n.1, p.233-241, 1999.

LENHART, K. et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.27, p.645–654, 2002.

LI, D.; DING, X.; WU, J.. Simulating the regional water balance through hydrological model based on TRMM satellite rainfall data. **Hydrology And Earth System Sciences Discussions**, v.12, n.2, p.2497-2525, 2015. Copernicus GmbH.

LIU, J. et al. Evaluation of Three Satellite Precipitation Products TRMM 3B42, CMORPH, and PERSIANN over a Subtropical Watershed in China. **Advances In Meteorology**, v.2015, p.1-13, 2015. Hindawi Publishing Corporation.

LIMA, L. S. **Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem dinâmica**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

MA, L., et al. Root Zone Water Quality Model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation. **Transactions of the ASAE**, v.43, n.4, p. 883-895, 2000.

MALUTTA, S. **Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho - SC com o modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. 126 p.

MASIH, I. et al. Assessing the Impact of Areal Precipitation Input on Streamflow Simulations Using the SWAT Model1. **Journal Of The American Water Resources Association**, v.47, n.1, p.179-195, 2010. Wiley-Blackwell.

MENDES, C. A. B. **Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto na região estuarina da Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990. 191 p.

MERRITT, W.S., LETCHER, R.A., JAKEMAN, A.J. A Review of Erosion and Sediment Transport Models. **Science Direct**. Environmental Modelling e Software, p.761–799. 2003.

MICHAELIDES, S. et al. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. **Atmospheric Research**, v.94, n.4, p.512-533, 2009. Elsevier BV.

MONTEIRO, J. A. F. et al. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrology Process**, v.30, n.9, p.1419-1430, 2015. Wiley-Blackwell.

MORENO, H. A. et al. Utility of Quantitative Precipitation Estimates for high resolution hydrologic forecasts in mountain watersheds of the Colorado Front Range. **Journal Of Hydrology**, v.438-439, p.66-83, 2012. Elsevier BV.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v.50, n.1, p.885-900, 2007.

OCHOA, A. et al. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru. **Hydrology And Earth System Sciences**, v.18, n.8, p.3179-3193, 2014.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, v.50, n.9, p.7100-7114, 2014. Wiley-Blackwell.

PINTO, N. L. S. et al. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 278 p.

PRECIPITATION MEASUREMENT MISSION (PMM). **TRMM Mission Comes to an End after 17 Years**. 2016. Disponível em:< <https://pmm.nasa.gov/trmm/mission-end>>. Acesso: 20 nov. 2016.

ROUHOLAHNEJAD. E. et al. A parallelization framework for calibration of hydrological models. **Environmental Modeling Software**, v.31, p.28-36, 2012.

SCHULTZ, G. A.; ENGMAN, E. T. **Remote sensing in hydrology and water management**. Springer. 2000. 483 p.

SOARES, A.; PAZ, A.; PICCILLI, D. Avaliação das estimativas de chuva do satélite TRMM no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.21, n.2, p.288-299, 2016. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH.

TOBIN, K. J.; BENNETT, M. E.. Temporal analysis of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) performance based on remotely sensed precipitation products. **Hydrological Processes**, v.27, n.4, p.505-514, 2013. Wiley-Blackwell.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/ABRH, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1998. 668 p.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T. Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality Models. **Water Science And Technology**, v.53, n.1, p.51–59, 2006.

XU, H. et al. Assessing the influence of rain gauge density and distribution on hydrological model performance in a humid region of China. **Journal Of Hydrology**, v. 505, p.1-12, 2013. Elsevier BV.

XUE, X. et al. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for

use in ungauged basins?. **Journal Of Hydrology**, v.499, p.91-99, 2013. Elsevier BV.

YAMASOE, M. **Meteorologia por satélite**. Apostila do curso de Meteorologia por Satélite. 2004. 29 p.

## ANEXOS

Anexo 01 - Relação dos parâmetros utilizados pelo SWAT na solução do balanço hídrico, com o processo, descrição e faixa de valores máximos e mínimos baseados na literatura.

Método	Parâmetro	Processo	Descrição	Faixa de valores	
				MIN	MÁX
a <sup>1</sup>	GW_DELAY	Águas subterrâneas	Tempo de atraso para a recarga do aquífero (dias)	-30	60
r <sup>2</sup>	ALPHA_BF		Constante de recessão do escoamento de base	0	1
a	GWQMN		A profundidade limite do aquífero superficial para que o escoamento superficial inicie (mm)	-1000	1000
v <sup>3</sup>	GW_REVAP		Coefficiente de saída de água subterrânea	0,02	0,2
r	REVAPMN		Profundidade limite do aquífero superficial para que ocorra percolação no aquífero profundo (mm)	0	500
a	RCHRG_DP		Coefficiente de percolação do aquífero	-0,05	0,05
r	GW_SPYLD	Umidade do solo	Rendimento específico do aquífero superficial (m/m)	0	0,4
r	SOL_CRK		Potencial de fissura do perfil do solo	0	1
r	SOL_BD		Densidade úmida aparente (mg/m³)	0,9	2,5
r	SOL_AWC		Capacidade de água disponível na camada de solo	0	1
r	SOL_K		Condutividade hidráulica saturada da primeira camada (mm/h)	0	2000
r	CH_W2	Escoamento superficial e tempo de concentração	Largura média do rio principal	0	1000
r	CH_S2		Inclinação média do rio principal (m/m)	-0,001	10
r	CH_L2		Comprimento do rio principal (km)	-0,05	500
v	CH_N2		Valor de Manning para o rio principal (mm/h)	0,01	0,2
v	CH_K2		Condutividade hidráulica efetiva do rio principal	0	10
r	CH_L1		Comprimento do maior canal afluente da sub-bacia (km)	0,05	20
r	CH_S1		Inclinação média dos rios contribuintes (m/m)	0,0001	10
r	CH_W1		Largura média dos rios contribuintes (m)	1	1000
v	CH_K1		Condutividade hidráulica efetiva (mm/h)	0	5
v	CH_N1		Valor de Manning para os rios contribuintes (mm/h)	0,01	0,02
r	OV_N		Valor de Manning para o fluxo terrestre (mm/h)	0,01	0,02
r	CN2		Valor inicial do SCS Curva-Número para a condição de umidade II	35	98
v	SURLAG	Fluxo lateral	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial	0,01	24
v	LAT_TTIME		Tempo de deslocamento do fluxo lateral (dias)	0	100

r	SLSOIL		Comprimento da encosta (m)	0	150
r	CANMX		Interceptação máxima da copa da árvore	0	100
v	ESCO	Evapotranspiração	Coefficiente de compensação da evaporação do solo	0,7	0,95
r	EPCO		Fator de compensação da absorção da planta	0	1

<sup>1</sup> Absoluto: o valor calibrado é adicionado ao valor do parâmetro existente;

<sup>2</sup> Relativo: o valor de parâmetro existente é multiplicado por 1 mais o valor calibrado;

<sup>3</sup> Substituir: o valor do parâmetro é substituído pelo valor calibrado.